

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CURADO INTERNO
MEJORADO EN CONCRETOS EXPUESTOS AL ATAQUE DE
SULFATOS Y/O CLORUROS**

POR

ING. LOTH IVONNE RODRIGUEZ BARBOZA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

JUNIO, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CURADO INTERNO MEJORADO
EN CONCRETOS EXPUESTOS AL ATAQUE DE SULFATOS Y/O CLORUROS**

POR

ING. LOTH IVONNE RODRIGUEZ BARBOZA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN**

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA R.

CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

CO-DIRECTOR EXTERNO:
DALE PATRICK BENTZ (NIST)

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO DE 2019



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UANL
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis con título **“EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CURADO INTERNO MEJORADO EN CONCRETOS EXPUESTOS AL ATAQUE DE SULFATOS Y/O CLORUROS”**, que presenta la Ing. Loth Ivonne Rodríguez Barboza, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 10 de junio de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

“Alere Flammam Veritatis”

Cd. Universitaria, 09 de mayo de 2019



DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL

Director de Tesis



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UANL
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis con título **“EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CURADO INTERNO MEJORADO EN CONCRETOS EXPUESTOS AL ATAQUE DE SULFATOS Y/O CLORUROS”**, que presenta la **Ing. Loth Ivonne Rodríguez Barboza**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 10 de junio de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

“Alere Flammam Veritatis”

Cd. Universitaria, 09 de mayo de 2019

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

Revisor



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UANL
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de la Tesis con título **“EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CURADO INTERNO MEJORADO EN CONCRETOS EXPUESTOS AL ATAQUE DE SULFATOS Y/O CLORUROS”**, que presenta la Ing. Loth Ivonne Rodríguez Barboza, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 10 de junio de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente
“Alere Flammam Veritatis”
Cd. Universitaria, 09 de mayo de 2019

Lauren Y. Gómez Z.
DRA. LAUREN Y. GÓMEZ ZAMORANO
Evaluador externo

Dedicatoria

Dedico este trabajo a los pilares de mi familia, a mi madre **Lorenza Barboza Morales** y mi abuelita **Audelia Morales Favila**, quienes han estado conmigo en todo momento, brindándome su apoyo y consejos, con respeto y cariño para ellas una parte fundamental en mi vida y mi desarrollo personal y profesional.

A mis hermanas, fuente de inspiración, orgullo y sin duda, una motivación para mí:

Edith Rodríguez Barboza,
Sarahí Rodríguez Barboza,
Rosa Rodríguez Barboza,
Marcela Rodríguez Barboza.

Y, sobre todo, a quien me ha sufrido, acompañado y motivado y en quien siempre he encontrado fortaleza en mis ratos de debilidad, a mi compañero de vida con toda mi admiración, cariño y respeto:

Miguel Ángel Guerra Cossío

Agradecimientos

- Agradezco principalmente a Dios, por darme la fortaleza necesaria para no darme por vencida, por permitirme llegar hasta aquí contando siempre con él en las buenas y en las malas.
 - Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber financiado este proyecto y haber otorgado la beca para el desarrollo del mismo.
 - A la Universidad Autónoma de Nuevo León y en especial a la subdirección de estudios de posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil por haberme permitido realizar mis estudios de maestría, por la formación recibida y la disponibilidad de recursos técnicos.
 - Al Dr. José Manuel Mendoza Rangel por aceptarme como su asesorada y compartir sus conocimientos, Por compartir este proyecto y permitirme desarrollarlo en conjunto con él.
 - Al Dr. Alejandro Duran Herrera. Por su apoyo a lo largo de esta investigación.
 - Al profesor Dale P. Bentz. Por su apoyo, motivación y orientación en las dudas de este proyecto y sobre todo por mostrarme que humildad e inteligencia se pueden encontrar en toda clase de personas.
 - Al Laboratorio de Investigación en Materiales de Construcción del Instituto de Ingeniería Civil por haber facilitado la utilización del espacio, tiempo y equipos para elaboración de las pruebas necesarias.
 - Al Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil por permitir el acceso a sus instalaciones y la utilización de equipos para la elaboración de mezclas.
 - Al Departamento de Eco materiales y Energía del Instituto de Ingeniería Civil por sus servicios y por permitir el uso de sus instalaciones para realización de pruebas.
 - A la Biblioteca del Instituto de Ingeniería Civil por el libre acceso a sus instalaciones y a su extenso acervo bibliográfico. En especial a la Lic. María de Jesús Puente Hernández.
 - Al personal de la Subdirección de Estudios de Posgrado de la facultad de Ingeniería Civil. En especial al Ing. Ramiro Torres y a la Srita. Jessyca Saucedo.
-

- A Dara Castañeda, Federico, Yarelli Díaz, José David Betancourt, Sergio Gutiérrez, Daniel Gálvez y Rene, por el apoyo en las pruebas llevadas a cabo para el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros de generación:

- ❖ Miguel Ángel Guerra Cossío
- ❖ Gildardo Javier Ziga Carbarín
- ❖ Daniel Gálvez Moreno
- ❖ David García Sánchez
- ❖ Francisco David Anguiano Pérez
- ❖ José Mauro Villarreal Ortega

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 CEMENTO PORTLAND	3
2.1.1. Producción del cemento portland	3
2.1.2. Hidratación del cemento portland.....	5
2.2. EL CONCRETO.....	6
2.3. SOSTENIBILIDAD	7
2.3.1. Materiales cementantes suplementarios (MCS)	9
2.4. DURABILIDAD	12
2.4.1 Periodo de propagación	13
2.4.2. Causas del deterioro del concreto.....	14
2.5. AGENTES QUÍMICOS QUE AFECTAN EL CONCRETO	14
2.5.1. Corrosión del acero de refuerzo y exposición a iones cloruro	14
2.5.2. Ataque por sulfatos	16
2.5.3 Interacción entre sulfato y cloruros	18
2.6. CURADO DEL CONCRETO	19
2.6.1. Curado interno	19
2.6.2. Tecnología VERDiCT	20
CAPITULO 3. ANTECEDENTES	22
3.1. JUSTIFICACIÓN	25
3.2. HIPÓTESIS	26
3.3. OBJETIVOS.....	26
3.3.1. Objetivo general	26
3.3.2. Objetivos específicos.....	26
CAPITULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	27
4.1. MATERIALES.....	27
4.1.1. Cemento.....	27
4.1.2. Ceniza Volante	29

4.1.3. Agregados.....	30
4.1.4. Características físicas de los agregados.....	32
4.1.5. Agua.	33
4.1.6. Aditivos.	33
4.1.7. Acero.	34
4.2. DISEÑO DE MEZCLAS	35
4.2.1. Resumen de mezclas.....	35
4.2.2. Mezclas.....	36
4.2.3. Preparación.	36
4.2.4. Mezclado.	36
4.2.5. Colocación.	36
4.2.6. Curado.	37
4.3. MÉTODOS Y ENSAYOS	38
4.3.1. Técnicas de caracterización	38
4.4. ENSAYOS Y PRUEBAS FISICO-MECANICAS	41
4.4.1. Propiedades en estado fresco del concreto	41
4.4.2. Propiedades en estado fresco del Mortero.....	42
4.4.3. Propiedades en estado endurecido del concreto y mortero.....	44
4.5. PRUEBAS DE DURABILIDAD.....	46
4.5.1. Ambientes de exposición.....	46
4.5.2. Cambios de longitud.....	46
4.5.3. Pruebas Electroquímicas.....	48
CAPITULO 5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
5.1. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DE PARTIDA.....	51
5.1.1. Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	51
5.1.2. Difracción de rayos X (DRX).....	53
5.2. PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS	56
5.2.1. Propiedades en estado fresco.....	56
5.2.2. Propiedades en estado endurecido.....	58
5.2.3. Mediciones Electroquímicas.....	81

CAPITULO 6. CONCLUSIONES	95
Anexo A. Cambios de longitud	97
Anexo B. Potenciales de corrosión (E_{corr})	99
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cemento Portland.....	3
Figura 2. Composición química de los materiales cementantes suplementarios [21].	9
Figura 3. Modelo de vida útil de Tuutti [29].	13
Figura 4. Representación esquemática de corrosión electroquímica.....	15
Figura 5. Distribución de tamaño de partícula del cemento CPO 40.	28
Figura 6. Distribución de tamaño de partícula del cemento Tipo V.....	28
Figura 7. Distribución de tamaño de partícula de la CV.	30
Figura 8. Comparación granulométrica de los agregados finos.	32
Figura 9. Funcionamiento del Microscopio Electrónico de Barrido [79].....	38
Figura 10. Representación gráfica de la ley de Bragg [82]	40
Figura 11. Prueba de revenimiento para concreto.	41
Figura 12. Prueba de peso volumétrico.	42
Figura 13. Prueba de contenido de aire para mezclas de concreto.	42
Figura 14. Prueba de revenimiento para mortero.	43
Figura 15. Prueba de contenido de aire para mortero.....	43
Figura 16. Ensayo de resistencia a compresión concreto.	44
Figura 17. Ensayo de resistencia a compresión de mortero.	45
Figura 18. Probetas para cambios de longitud a) mortero y b) concreto.....	46
Figura 19. a) Medición de la barra de calibración, b) Medición de la barra de mortero, c) Medición de la barra de concreto.	47
Figura 20. Medición de pruebas electroquímicas.....	49
Figura 21. Esquema de probetas de mortero para medición de pruebas electroquímicas.....	50
Figura 22. Esquema de probetas de concreto para medición de pruebas electroquímicas.....	50
Figura 23. Micrografía de la morfología de las partículas de cemento CPO 40.	51
Figura 24. Micrografía de la morfología de las partículas de cemento tipo V.	52
Figura 25. Micrografías de la morfología de las partículas de Ceniza Volante.	53
Figura 26. Identificación por EDS de una partícula de carbón sin quemar.....	53
Figura 27. Patrón de difracción de rayos X del cemento CPO-40.	54
Figura 28. Patrón de difracción de rayos X del cemento Tipo V.....	55

Figura 29. Patrón de difracción de rayos X de la Ceniza Volante (CV).	55
Figura 30. Resistencias a compresión (MPa) de morteros de cemento CPO 40 expuestas a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgCl_2$ y c) $MgSO_4 - MgCl_2$	60
Figura 31. Resistencias a compresión de mezclas de concreto de cemento CPO 40 expuestas a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgCl_2$ y c) $MgSO_4 - MgCl_2$	62
Figura 32. Resistencias a compresión de muestras de mortero de cemento Tipo V expuestos a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgCl_2$ y c) $MgSO_4 - MgCl_2$	65
Figura 33. Resistencias a compresión de muestras de concreto de cemento Tipo V expuestos a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgCl_2$ y c) $MgSO_4 - MgCl_2$	67
Figura 34. Expansión de muestras de mortero de cemento CPO 40 expuestos a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgSO_4 - MgCl_2$	72
Figura 35. Expansión de muestras de Concreto de cemento CPO 40 expuestas a solución de a) $MgSO_4$ y b) $MgSO_4 - MgCl_2$	74
Figura 36. Expansiones de muestras de mortero de cemento tipo V expuestos a solución de a) $MgSO_4$, y b) $MgSO_4 - MgCl_2$	76
Figura 37. Expansiones de muestras de concreto de cemento Tipo V expuestos a solución de a) $MgSO_4$, y b) $MgSO_4 - MgCl_2$	78
Figura 38. Potenciales de corrosión de barras de acero embebidas en especímenes de mortero elaborados de cemento CPO 40 (Figuras derecha) y TIPO V (Figuras izquierda), expuestos a solución de a), b) $MgCl_2$, y c), d) $MgSO_4 - MgCl_2$	83
Figura 39. Potenciales de corrosión en barras de acero embebidas en especímenes de concreto elaborados de cemento CPO 40 (Figuras derechas) y TIPO V (Figuras izquierdas) expuestos a solución de a), b) $MgCl_2$ y c), d) $MgSO_4 - MgCl_2$	85
Figura 40. Densidad de corriente de corrosión y densidad de corriente de corrosión acumulada, de barras de acero en especímenes de mortero y concreto de cemento CPO 40 expuestos a solución de a) $MgCl_2$, y b) $MgSO_4 - MgCl_2$	90
Figura 41. Densidad de corriente de corrosión y densidad de corriente de corrosión acumulada, de barras de acero en especímenes de mortero y concreto de cemento TIPO V expuestos a solución de a) $MgCl_2$, y b) $MgSO_4 - MgCl_2$	92
Figura 42. Cambios de longitud de mezclas de mortero y concreto de cemento portland en solución de a) $MgSO_4$ y b) $MgSO_4 - MgCl_2$	97

Figura 43. Cambios de longitud de mezclas de mortero y concreto de cemento TIPO V en solución de a) MgSO_4 y b) $\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$	98
Figura 44. Potenciales de corrosión de mezclas de mortero y concreto de cemento portland en solución de a) MgCl_2 y b) $\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$	99
Figura 45. Potenciales de corrosión de mezclas de mortero y concreto de cemento TIPO V en solución de a) MgCl_2 y b) $\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de Cemento portland.	4
Tabla 2. Composición química (ASTM C150).	5
Tabla 3. Composición química de los cementos utilizados.	27
Tabla 4. Requerimientos para ceniza CV.	29
Tabla 5. Composición química de la CV.	29
Tabla 6. Granulometría del agregado grueso.	30
Tabla 7. Granulometría del agregado Fino (calizo) y agregado ligero (pumicita).	31
Tabla 8. Características físicas de los agregados.	33
Tabla 9. Características del acero de refuerzo.	34
Tabla 10. Nomenclaturas asignadas a los diferentes tipos de mezclas.	35
Tabla 11. Probabilidad de presencia de corrosión por rangos de E_{corr}	48
Tabla 12. Estado del acero con respecto a la I_{corr} [93].	49
Tabla 13. Propiedades en estado fresco de mezclas de concreto (C).	56
Tabla 14. Propiedades en estado fresco de mezclas de mortero (M).	56
Tabla 15. Reducción de resistencia a los 90 días de mezclas de Mortero y Concreto de cementos mezclados expuestos en soluciones de $MgSO_4$ (MS), $MgCl$ (MCl) y $MgSO_4 + MgCl$ (MS+MCl).	68

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

Materiales:

CPO: Cemento Portland Ordinario

CPO TIPO V: Cemento Resistente a Sulfatos

MCS: Materiales Cementantes Suplementarios

CV: Ceniza Volante

SRA: Aditivo Reductor de Retracción

a/c: Relación agua/cemento

Cemento:

C: CaO Óxido de Calcio (Calcio)

S: SiO₂ Óxido de Silicio (Sílice)

A: Al₂O₃ Óxido de Aluminio (Alúmina)

F: Fe₂O₃ Óxido de Hierro (Hematita)

H: H₂O Agua

M: MgO Óxido de Magnesio (Magnesia)

S: SO₃ Trióxido de Azufre

C: CO₂ Dióxido de Carbono

Fases del Cemento:

C₃S: Ca₃SiO₅ Silicato Tricálcico (alita)

C₂S: Ca₂SiO₄ Silicato Dicálcico (belita)

C₃A: Ca₃Al₂O₆ Aluminato Tricálcico (Aluminato)

C₄AF: Ca₂(AlFe)O₅ Aluminoferrita Tetracálcica (fase ferrita)

Productos de Hidratación:

C-S-H: Silicato de calcio hidratado

M-S-H: Silicato de magnesio Hidratado

CH: Portlandita (Hidróxido de Calcio: Ca(OH)₂)

AFt: Trisulfato (Etringita: 3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O)

AFm: Monosulfato (3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·12H₂O)

SF: Sal de Friedel ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)

Bt: Brucita (Hidróxido de magnesio: $\text{Mg}(\text{OH})_2$)

Experimentación:

MEB: Microscopía Electrónica de Barrido

DRX: Difracción de Rayos X

FRX: Florescencia de rayos X

DTP: Distribución de Tamaño de Partícula

RC: Resistencia a la Compresión

CL: Cambio de longitud

Ecorr: Potencial de corrosión

Icorr: Densidad de corriente de corrosión o velocidad de corrosión

Soluciones de exposición:

SM: Sulfato de magnesio

CM: Cloruro de magnesio

RESUMEN

El ataque por agentes químicos al concreto ha sido un tema que ha tomado importancia desde hace años, debido a la gama de problemas que estos representan en la durabilidad de las estructuras de concreto. A causa del crecimiento de la población, la industria de la construcción se ha visto en la necesidad de buscar alternativas que permitan seguir construyendo, pero ahora dando un enfoque para la elaboración de estructuras con mayor durabilidad y sobre todo proporcionando un aporte al desarrollo sostenible.

Investigaciones anteriores, han propuesto alternativas para reducir el ataque químico al concreto, mediante la aplicación de diferentes prácticas, En el presente estudio se evaluó la eficiencia de una tecnología que tiene como función mitigar el ingreso de especies iónicas provenientes del medio ambiente, mediante la introducción de una solución 50:50 de un aditivo reductor de la retracción y agua, utilizando como vehículo un agregado ligero (pumicita) para la introducción de dicha solución. Se evaluó la resistencia a compresión durabilidad de concretos y morteros expuestos a ambientes de sulfatos y cloruros. Así como una comparación en la eficiencia de mortero y concretos elaborados con dos tipos de cemento, donde se encontró que las mezclas que contenían la tecnología fueron las que mostraron una mejor eficiencia en morteros y concretos.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo en las obras civiles tales como puentes, edificios, hospitales, escuelas, carreteras, etc. Esto es debido a las muchas ventajas que brinda como su trabajabilidad, versatilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad [1]. Estas propiedades, además de su bajo costo y la disponibilidad de materia prima para su fabricación, hacen a este material una opción económica y de fácil utilización.

Las estructuras de concreto reforzado juegan un papel importante en el ámbito de la construcción. Además, de ser necesarias, representan el crecimiento de una sociedad próspera. Por esta razón es importante poner atención a la problemática a la que se enfrenta la industria de la construcción, ya que uno de los principales retos que presentan dichas estructuras es el alto índice de deterioro debido a la cantidad de agentes químicos presentes en el medio ambiente [2], los cuales reducen su durabilidad. Por lo tanto, los concretos deben diseñarse y construirse para presentar un desempeño adecuado frente al ambiente al que será expuesto.

En los últimos años se han propuesto la utilización de desechos industriales (por ejemplo, ceniza volante, humo de sílice y escorias de fundición, etc.) y el reciclaje del concreto [3–6]. Estos desechos industriales funcionan como adiciones puzolánicas en mezclas de mortero o concreto como remplazo parcial del cemento portland, ya que estas proporcionan soluciones satisfactorias en cuanto a problemas de durabilidad.

En un principio las propiedades físico-mecánicas se asociaban a la durabilidad de los concretos, pero las experiencias prácticas y el avance de la investigación han demostrado que estos aspectos son necesarios más no fundamentales para la obtención de un concreto durable. El mal diseño y las practicas inadecuadas en la colocación de concretos dan lugar a la formación de grietas y porosidad, a través de las cuales, por medio de difusión, puede ocurrir el ingreso de agentes agresivos como: los sulfatos (SO_3), cloruros (Cl^-), el dióxido de

carbono (CO_2). Por esta razón resulta necesario el mejoramiento y la prolongación de la vida útil de dichas estructuras [7,8].

Dependiendo de las condiciones del entorno ambiental, los fenómenos de degradación se presentan tanto en la pasta como en la varilla de refuerzo de dichas estructuras. Aun y cuando el concreto es capaz de actuar como una protección física y química para la varilla de refuerzo, bajo ciertas condiciones el metal tiende a desarrollar fenómenos de corrosión [9,10]. El deterioro por agentes químicos incluye generalmente interacciones químicas entre los agentes químicos y los constituyentes de la pasta de cemento [11]. Esta investigación pretende incrementar la durabilidad del concreto densificando la matriz cementante mediante el uso de un aditivo reductor de la retracción SRA y un agregado ligero, con el fin de mitigar los agentes químicos causantes del deterioro de las estructuras de concreto.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 CEMENTO PORTLAND

El cemento portland (CPO) (Ver Figura 1) es un polvo fino compuesto principalmente de silicatos de calcio obtenidos de la calcinación de materiales calcáreos y arcillosos hasta formar Clinker, el cual es un material hidráulico integrado de silicatos de calcio $[(\text{CaO})_3 \cdot \text{SiO}_2]$ y $[(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2]$, el resto contiene óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y otros óxidos como MgO , Mn_2O_3 , Na_2O , y K_2O . La relación en masa ($\text{CaO} / \text{SiO}_2$) no será inferior a 2. El contenido de óxido de magnesio (MgO) no excede los 5 % en masa [12].



Figura 1. Cemento Portland.

2.1.1. Producción del cemento portland

La materia prima (arcilla, caliza y mineral de hierro) se extrae de las canteras y pasa a un proceso de trituración primaria y secundaria. Los materiales se almacenan por separado y ya triturados se combinan en proporciones específicas para someterse a molienda, a esto se le conoce como “crudo”. Después de la molienda del crudo, estos materiales pasan al pre calentador del horno rotatorio, durante esta fase del proceso la mayor parte de la caliza triturada es descarbonatada, para posteriormente llegar al molino rotatorio en el cual se calcinará a una temperatura aproximada de $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dentro del molino rotatorio se forma el Clinker el cual es enfriado rápidamente para mantener las fases formadas en su estado metaestable [13].

El Clinker se combina con yeso para controlar la velocidad de hidratación debida a los aluminatos, además de otras adiciones (dependiendo del tipo de cemento) para la formación del cemento Portland.

En la actualidad se fabrican diferentes tipos de cementos para satisfacer especificaciones dependiendo de los requerimientos. Las especificaciones están dadas de acuerdo a la norma ASTM C150 [14], para cemento portland. (Standard Specification for Portland Cement), designa ocho tipos de cementos, usando los números romanos como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de Cemento portland.

Tipo de Cemento	Descripción
I	Normal.
IA	Normal con aire incluido.
II	Moderada resistencia a los sulfatos.
IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido.
III	Alta resistencia inicial. (Alta resistencia temprana).
IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido.
IV	Bajo calor de hidratación.
V	Alta resistencia a los sulfatos.

Los cementos aún se dividen en clases de resistencia: 20, 30, 40, las cuales designan resistencias a compresión mínima a los 28 días de 20 MPa, 30 MPa y 40 MPa (200 kg/cm², 300 kg/cm² y 400 kg/cm²), respectivamente.

Hay dos clases más de resistencia: 30R y 40R, que además de presentar resistencia a compresión mínima a los 28 días de 30 MPa y 40 MPa, respectivamente, también deben presentar resistencia a compresión a los 3 días de 20 MPa (200 kg/cm²) y 30 MPa (300 kg/cm²), respectivamente. La norma también especifica resistencias máximas a los 28 días, para las clases 20, 30 y 30R. El tiempo mínimo de fraguado inicial de todas las clases es 45 minutos. Los cementos se designan por uno de los 6 tipos de cementos, seguido por la clase de resistencia y por la característica especial. Por ejemplo, un cemento portland puzolánico de clase resistente 30R, de baja reactividad álcali-agregado y bajo calor de hidratación, se

designaría como CPP 30R BRA/BCH. En la Tabla 2 se presentan los diferentes tipos de cementos y su composición química.

Tabla 2. Composición química (ASTM C150).

Tipo de cemento	Composición Química (%)							Composición Potencial				Finura Blaine m ² /kg
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
I	20.5	5.4	2.6	63.9	2.1	3.0	0.61	54	18	10	8	369
II	21.2	4.6	3.5	63.8	2.1	2.7	0.51	55	19	6	11	377
III	20.6	4.9	2.8	63.4	2.2	3.5	0.56	55	17	9	8	548
IV	22.2	4.6	5.0	62.5	1.9	2.2	0.36	42	32	4	15	340
V	21.9	3.9	4.2	63.8	2.2	2.3	0.48	54	22	4	13	373
Blanco	22.7	4.1	0.3	66.7	0.9	2.7	0.18	63	18	10	1	482

2.1.2. Hidratación del cemento portland

Las características principales de un concreto (fraguado, calor de hidratación, etc) dependen, entre otras cosas, del mecanismo de hidratación de los compuestos del cemento, es de suma importancia conocer este mecanismo ya que dependiendo de la estabilidad de este mecanismo se podrá obtener como producto final un concreto con buenas propiedades físicas y químicas a corto y largo plazo.

Silicato Tricálcico (C₃S): Se hidrata y se endurece rápidamente y es responsable, en gran parte, por el inicio del fraguado y la resistencia temprana. En general, la resistencia temprana del concreto de cemento portland es mayor, cuando el porcentaje de C₃S aumenta.

Silicato Dicálcico (C₂S): Se hidrata y se endurece lentamente, contribuye grandemente para el aumento de resistencia en edades más allá de una semana.

Aluminato Tricálcico (C_3A): Libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación. También contribuye un poco para el desarrollo de resistencia temprana. Cementos con bajos porcentajes de C_3A confieren mejor resistencia a suelos y aguas con sulfatos.

Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF): Es el producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización (clinkerización o cocción) durante la fabricación del cemento. Este compuesto contribuye muy poco para la resistencia. La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben al C_4AF y sus hidratos.

2.2. EL CONCRETO

El concreto es un material compuesto clasificado como un cerámico, el cual se encuentra conformado por una pasta en la cual se encuentran embebidas partículas o fragmentos de agregados como: (Arena y Grava) y un cementante formado por cemento hidráulico, agua y en ocasiones algunos aditivos [15].

Es uno de los materiales más utilizados en construcción de obras civiles debido a las propiedades que aporta como: su alta resistencia a compresión, versatilidad, endurecimiento bajo el agua, se puede utilizar en todo tipo de elementos estructurales.

En la actualidad ya no es muy común encontrar concretos convencionales ya que la mayoría incluyen el uso de un aditivo o adición de algún cementante suplementario, distinto de los agregados, cemento hidráulico, y agua, utilizados como ingredientes en la mezcla para modificar sus propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido [16].

El concreto además de las ventajas por las cuales es altamente utilizado en construcción, trae consigo una serie de problemas como el problema originado por el uso masivo de cemento portland, ya que en su proceso de producción se emiten grandes cantidades de CO_2 al medio ambiente, otro aspecto importante a mencionar son los problemas de durabilidad que presentan las estructuras de concreto, derivados de una fabricación inadecuada, un curado inadecuado, falta de mantenimiento, etc. Como consecuencia de lo anterior el concreto tendría mayor susceptibilidad a los agentes químicos del medio que lo rodea, lo que

ocasionaría el deterioro de la estructura y su posterior demolición, si dicho deterioro fuera irreversible, este aspecto, de cierta forma también es un problema que produce contaminación debido al desperdicio (escombros) resultado de la demolición. Volviendo al primer punto nuevamente para la reconstrucción de la estructura tendría que recurrirse a la fabricación de cemento. Por esta razón se han ido buscando alternativas mediante las cuales pueda reducirse al mínimo esta problemática y de esta forma hacer un aporte al desarrollo sostenible.

2.3. SOSTENIBILIDAD

El desarrollo Sostenible busca satisfacer las necesidades de las generaciones actuales, pero sin afectar la capacidad de las futuras, y en términos operacionales, promover el progreso económico y social respetando los ecosistemas naturales y la calidad del medio ambiente [17].

El desarrollo sostenible ha tomado gran importancia debido al cambio climático un problema que compete a la sociedad. El principal problema que contribuye a este cambio climático son los gases de efecto invernadero (GEI). Entre ellos se encuentran el metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O_3) y el bióxido de carbono (CO_2). Estas emisiones provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas).

Enfocando esta problemática a la industria de la construcción ya que es una de las más contaminantes por diversas razones, en la producción del cemento, que es el principal ingrediente para la fabricación de concreto, se emiten grandes cantidades de CO_2 . La producción de cemento contribuye aproximadamente con el 7% de emisiones de CO_2 a nivel mundial, debido a que se generan de 0.7 a 1.1 toneladas de CO_2 por tonelada de cemento producida [18]. Las dos principales razones de las emisiones de dióxido de carbono emitidas por la fabricación de cemento son:

- Durante el proceso de descarbonatación de la caliza y otros materiales calcáreos para la producción del Clinker, este proceso comprende aproximadamente el 60% del total de las emisiones directas de CO_2 .

- La quema de combustible fósiles utilizados para alcanzar los 1450° requeridos para el proceso de clinkerización, este proceso comprende alrededor del 40% del total de emisiones directas de CO₂.

Debido al resultado negativo de estos impactos ambientales, autoridades nacionales e internacionales en la industria del cemento se han fijado metas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (emisiones de CO₂) [19].

Actualmente una de las estrategias que han sido adoptadas para disminuir este impacto negativo de la industria cementera sobre el medio ambiente son:

- El uso de combustibles o materia prima alternativa durante la fabricación de cemento.
- La reducción del Clinker mediante el remplazo de una parte de cemento por desechos industriales, también llamados cementantes suplementarios, los cuales poseen propiedades similares al cemento portland, de esta manera se puede reducir el uso masivo del mismo [20].
- Y otro punto muy importante buscar nuevas tecnologías que permitan dar solución a los problemas de deterioro que presentan las estructuras de concreto y de esta forma contribuir con su durabilidad.

2.3.1. Materiales cementantes suplementarios (MCS)

Los materiales cementantes suplementarios o también llamados aditivos minerales son materiales muy finos que son incorporados a la mezcla en diferentes cantidades, estos materiales tienen como función reaccionar con los productos de hidratación del cemento principalmente con el hidróxido de calcio CH para la formación de silicato de calcio hidratado C-S-H que es el principal producto de hidratación responsable de las propiedades mecánicas del concreto.

La ASTM clasifica estos materiales de la siguiente manera:

Hidráulicos latentes: son materiales que por sí mismos poseen propiedades cementantes pero que requieren de activación para acelerar las reacciones.

Puzolanas: son materiales silicosos o silicoaluminosos que poseen nulo o muy pobre valor cementoso, pero al estar finamente molidos y en presencia de hidróxido de calcio y agua se combinan para la formación de fases hidratadas con propiedades cementantes. La razón por la que se hace distinción entre puzolanas y escorias radica en su composición química, y se puede ver gráficamente en el diagrama ternario presentado en la Figura 2, en el cual se observan algunas de las puzolanas y escorias de acuerdo a su composición.

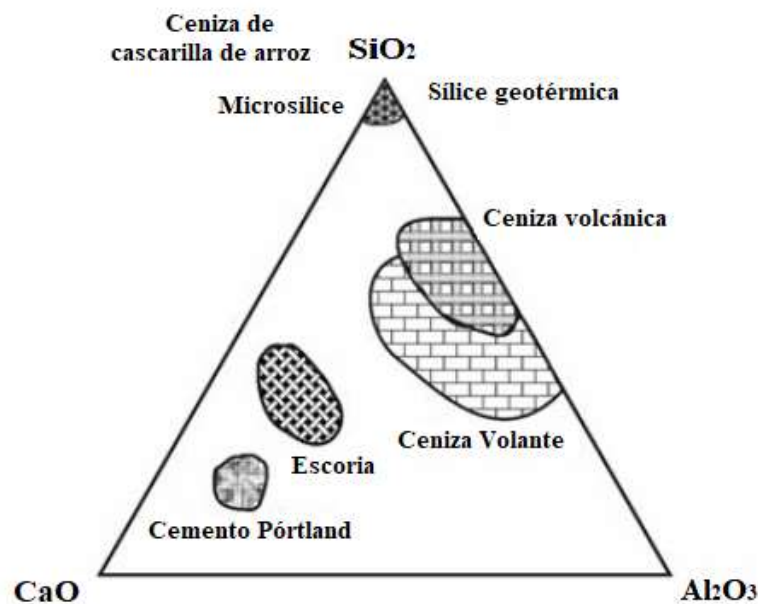


Figura 2. Composición química de los materiales cementantes suplementarios [21].

2.3.1.1 Humo de sílice o Microsílice (MS)

El humo de sílice es un coproducto originado de la fabricación de silicio metálico, aleaciones de ferrosilicio y en ocasiones de la fabricación de circonio. Estos metales se producen en hornos de arco eléctrico donde ocurre la reducción del cuarzo a alta temperatura, el cuarzo de alta pureza se calienta a 2000°C con carbón, coque o astillas de madera como combustible. Durante el proceso se forman vapores de SiO dentro del arco, y cuando estos vapores escapan de la carga del horno y entran en contacto con el aire, se oxidan y forman pequeñas partículas vítreas de SiO_2 , cien veces más finas que las partículas de cemento portland. Estas partículas finas se recogen mediante sistemas de desempolvado donde ocurre la separación de partículas gruesas de las finas, de esta separación de partículas se genera la MS como deshecho [22].

2.3.1.2 Escoria de alto horno (EAH)

La EAH se forma a partir de una fase líquida a temperaturas de $1350\text{-}1550^{\circ}\text{C}$ en la manufactura del hierro cuando el CaCO_3 reacciona con materiales ricos en SiO_2 y Al_2O_3 asociados con el mineral o cenizas producidas por el coque, para formar un material de silicatos y aluminosilicatos cálcicos de composición variable. Durante su salida rápida del alto horno, su enfriamiento rápido previene la formación de cristales de gran tamaño, y el material granular resultante comprende alrededor del 95% de aluminosilicatos de calcio no cristalinos.

En presencia de agua la EAH puede reaccionar muy lentamente pero su proceso de reacción es tan lento que por sí sola su uso es impráctico. Esencialmente, el comportamiento hidráulico de la EAH se relaciona con su estructura vítrea y para promover su reactividad se requiere alguna forma de activación. En la práctica, la activación se promueve mediante el mezclado de la EAH con CPO debido a que este último contiene alkalis (CaOH_2 , NaOH , KOH) y sulfatos [23].

2.3.1.3 Ceniza Volante (CV)

En esta investigación se hará uso de ceniza volante, un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad, la CV se puede clasificar en: Ceniza volante baja en calcio (ASTM Clase F) producida por la combustión de antracita o carbón bituminoso, y ceniza volante con alto contenido de calcio, (ASTM Clase C) producida por la quema de carbón de lignito o sub-bituminoso [24]. La ceniza clase F se clasifica como una puzolana normal, que consiste en un material de vidrio de silicato, modificada con aluminio y hierro, la cual requiere Ca(OH)_2 para formar productos de hidratación (reactividad puzolánica), por esta razón se utiliza en combinación con cemento Portland, que produce Ca(OH)_2 durante su hidratación. Se reduce el calor de hidratación y mejora la durabilidad cuando se utiliza en concreto como un sustituto de cemento. También contribuye a la resistencia del concreto por la acción puzolánica y los efectos de relleno [25].

El papel principal de la ceniza volante en el concreto consta de tres aspectos: Efecto morfológico, efecto puzolánico, y el efecto de micro agregado. El efecto morfológico consiste en que las partículas de ceniza volante son microesferas que trabajan como “bolas lubricantes” que al ser incorporado en la mezcla en estado fresco le da una mayor trabajabilidad, por lo que beneficia su fluidez. En el efecto de micro agregado las microesferas de la ceniza volante pueden dispersarse bien en el concreto y combinarse con el gel producido en la hidratación del cemento, y promover la densificación de la pasta del concreto. Y el efecto puzolánico que es el principal beneficio de la ceniza volante, establece que el Al_2O_3 y SiO_2 en la ceniza volante son activados por el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , producto de la hidratación del cemento y así producir más gel (CSH) [26].

El uso de materiales cementantes suplementarios como la ceniza volante en el concreto, permite tener una influencia favorable sobre las propiedades de la mezcla tanto en estado fresco como en estado endurecido, algunas de estas son: mejorar la trabajabilidad de la mezcla, reducir el agrietamiento generado por el calor de hidratación, el aumento de la durabilidad del concreto frente ataque químico por la densificación de la matriz cementante [27].

2.4. DURABILIDAD

Según ACI 201, la durabilidad del concreto de cemento portland se define como su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, sin perder sus propiedades de ingeniería [28]. Otra definición de durabilidad propuesta por J. M. Mendoza Rangel y P. Castro Borges, que toma en cuenta el efecto del cambio climático global dice que es la “Capacidad que tiene un material de construcción, elemento o estructura de concreto de resistir a las acciones físicas, químicas, biológicas y ambientales vinculadas al efecto del cambio climático global con su entorno durante un tiempo determinado previsto desde el proyecto, manteniendo su serviciabilidad conservando su forma original, propiedades químicas y condiciones de servicio” [8].

El concreto por su composición es uno de los materiales más durables en la construcción ante la menor falta de mantenimiento, en comparación con otros materiales (acero, madera etc.) los cuales necesitan de cuidados de forma periódica para que no sufran un deterioro acelerado al ponerse en funcionamiento. Sin embargo, afirmar que el concreto es un material durable es posible si se ha tenido un control de calidad adecuado al momento de su elaboración; es decir, el concreto será durable si no se indujeron factores que afecten la vida útil del material (procedimientos constructivos deficientes, relaciones a/c altas, mala calidad de los materiales que lo conforman, dosificación inadecuada y falta de mantenimiento).

Las estructuras de concreto reforzado tienen una vida útil que comprende un periodo que va desde el momento de su concepción, hasta el colapso de la estructura derivado del deterioro, La vida útil de las estructuras de concreto reforzado puede dividirse en dos periodos como se muestra en la Figura 3. Durante el periodo de iniciación ingresan desde la superficie sustancias agresivas como (CO_2 , cloruros) que pueden despasivar el acero, primero ocurre la carbonatación esta inicia desde la superficie del concreto hacia zonas internas, el dióxido de carbono de la atmosfera puede neutralizar la alcalinidad del concreto de tal forma que el pH de la solución de los poros disminuye a tal punto que la capa pasiva del acero no es más pasiva. Por consiguiente, los iones cloruro pueden penetrar el concreto y alcanzar el acero de refuerzo; si la concentración en la superficie de acero alcanza un nivel crítico la capa pasiva puede ser destruida y de ahí se da origen a la corrosión. La duración de la fase inicial depende

en mayor medida de la profundidad, calidad del recubrimiento y de la velocidad de movilidad de los agentes agresivos a través del recubrimiento.

2.4.1 Periodo de propagación

El periodo de propagación es aquel en el que el acero de refuerzo presenta corrosión activa. una vez destruida la capa protectora, la corrosión se producirá si hay agua y oxígeno presentes en la superficie del refuerzo. La velocidad de corrosión determina el tiempo que tarda en alcanzar el estado mínimo aceptable de la estructura, teniendo en cuenta que esta velocidad de corrosión puede variar en función de la humedad y temperatura [9].

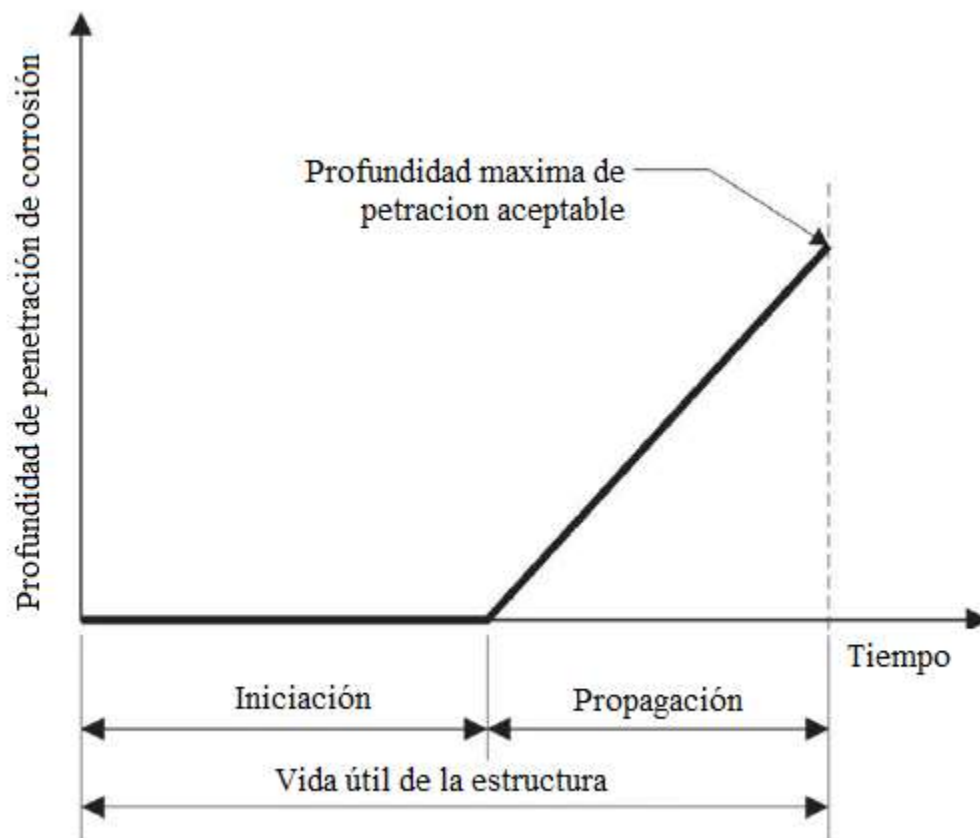


Figura 3. Modelo de vida útil de Tuutti [29].

De esta manera se entiende que la durabilidad del concreto no solo depende de la adecuada elaboración y colocación del concreto sino también al medio ambiente que lo rodea.

2.4.2. Causas del deterioro del concreto.

Entre las causas de deterioro del concreto existen dos clasificaciones que son las físicas que serían ocasionadas por abrasión o accidentes, y las químicas como congelamiento y deshielo, reacción álcali sílice, carbonatación, ataque por cloruros y sulfatos [30,31].

Todos los mecanismos químicos involucran el agua, y la velocidad con la que estos se desarrollen es dependiente de la facilidad con la que el agua (y sales disueltas en ella) puedan moverse dentro o a través de la estructura de poros. El ingreso de fluidos agresivos, como soluciones con iones sulfato o cloruro, ocurren en su mayoría a través del sistema de poros capilares formados en la pasta del concreto durante su hidratación y en la zona de transición interfacial. Algunos de los mecanismos de transporte son:

- Succión capilar: por poros insaturados.
- Difusión: por gradientes de concentración.
- Penetración: por carga hidráulica.
- Absorción: por evaporación.

2.5. AGENTES QUÍMICOS QUE AFECTAN EL CONCRETO

Existen diversos factores que influyen en la disminución de la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, causando el deterioro de las mismas, estos factores son: el medio al que las estructuras son expuestas, ya sea ambientes marinos, ciudades industrializadas, aguas subterráneas etc. A continuación se describen dos de los mecanismos de degradación que pudieran generar deterioro en las estructuras de concreto.

2.5.1. Corrosión del acero de refuerzo y exposición a iones cloruro

Los cloruros provenientes principalmente de ambientes marinos o sales de deshielo, son uno de los principales agentes corrosivos para el acero de refuerzo. La corrosión es una reacción electroquímica de la interacción de un metal con el medio que lo rodea, dando lugar al deterioro de sus propiedades tanto físicas como químicas y por consiguiente la destrucción del mismo. Los iones cloruro penetran por los poros capilares del concreto para debilitar el acero de refuerzo, dando lugar a reacciones que conducen a la formación de un óxido entre

las barras de acero y concreto la cual llega a medir el doble del diámetro del acero de refuerzo, por lo que puede dar lugar a formación de grietas y desprendimiento del concreto [32].

El concreto protege a la armadura de acero de refuerzo embebida de la corrosión, debido a su alta alcalinidad. El ambiente de pH alto en el concreto (normalmente mayor que 12.5) promueve la pasivación y la formación sobre el acero de una película de protección de óxido no corrosivo. Sin embargo, la presencia de iones cloruros en los anticongelantes y el agua del mar puede destruir o penetrar en la película. Cuando se alcanza el umbral de cloruros (aproximadamente 0.15% cloruros solubles en agua por peso de cemento), se forma una celda electroquímica la cual consiste en: un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo donde ocurre la reducción, un conductor metálico donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones, electrolito en este caso el concreto y la presencia de agua y oxígeno. De esta forma inicia la corrosión.

Cuando existe diferencia en el potencial eléctrico a lo largo del acero, se forman reacciones anódicas y catódicas, conectadas por el electrolito, los iones ferrosos con carga positiva Fe^{++} del ánodo entran en solución, mientras que los electrones libres con carga negativa pasan a lo largo del acero dentro de las zonas catódicas donde son absorbidos por los componentes del electrolito y combinados con oxígeno y agua, para formar iones hidroxilo $(OH)^{-}$. Estos iones se combinan con los iones ferrosos para formar óxido férrico $(FeOH)_3$, que a su vez se convierte en herrumbre [33] ver Figura 4.

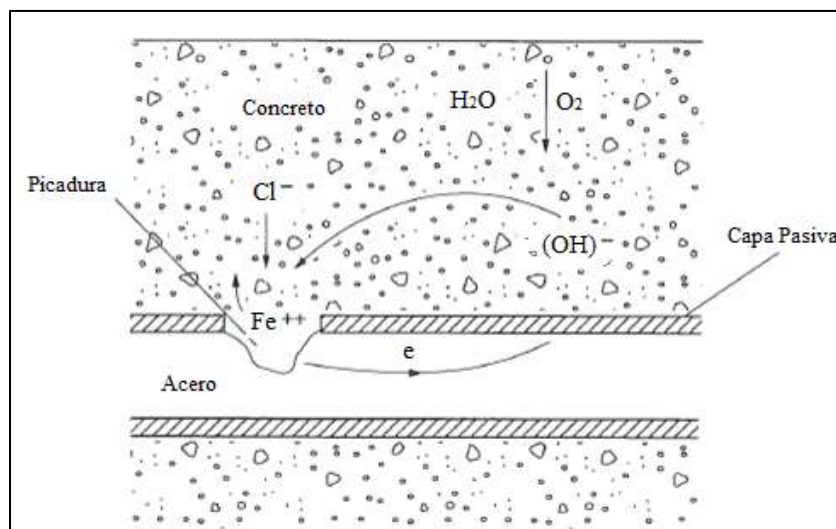


Figura 4. Representación esquemática de corrosión electroquímica.

El área de la sección transversal del acero también se puede reducir considerablemente. Una vez que empieza, la tasa (velocidad) de corrosión del acero es influenciada por la resistividad eléctrica del concreto, la humedad y la tasa de migración del oxígeno a través del concreto hacia el acero. Los iones cloruro pueden también penetrar en la capa pasiva del refuerzo; éstos se combinan con los iones de hierro, formando un compuesto de cloruro de hierro soluble, el cual lleva el hierro hacia el interior del concreto para más tarde oxidarse. La resistencia del concreto a los cloruros es buena, pero se puede mejorar con una baja relación agua-cemento (0.40), el tiempo de curado y el uso de materiales cementantes suplementarios, tales como cenizas volantes, para reducirse la permeabilidad [34].

2.5.2. Ataque por sulfatos

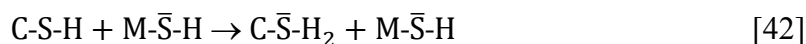
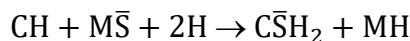
Uno de los problemas a tratar en esta investigación es el ataque de los sulfatos siendo este uno de los mayores problemas de deterioro de los materiales base cemento, como concreto, mortero y estructuras elaboradas de ambos materiales. El ataque de sulfatos genera una serie de reacciones químicas entre los iones sulfato y los componentes del concreto endurecido, principalmente la pasta de cemento, causada por la exposición del concreto a los sulfatos y la humedad. En el ataque de sulfatos externo, ocurre la migración de iones sulfato hacia el interior de la matriz cementante del concreto, debido a esto se propicia una serie de mecanismos que dan lugar a la formación de productos como etringita y yeso [35,36], estos productos causan expansiones y agrietamiento que conduce finalmente a una pérdida de resistencia [37].

La expansión en el concreto se debe a los compuestos débilmente solubles que se encuentran en el interior de la pasta de concreto y que dan origen al crecimiento de cristales, generando una presión capaz de llevar a la ruptura de la estructura. Principalmente los iones sulfato se encuentran en el suelo, aguas subterráneas, agua de mar, descomposición de materia orgánica, y efluentes industriales [38–40]. Según ACI 201, el agua utilizada en las torres de enfriamiento también puede ser una fuente potencial del ataque de sulfatos por el incremento gradual de estos al evaporarse el agua [26]. Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfato de sodio, sulfato de calcio y sulfato de magnesio cada uno de ellos con diferente solubilidad.

Al ingresar el sulfato de sodio (Na_2SO_4) reacciona con el hidróxido de calcio para formar sulfato de calcio (yeso) y fundamentalmente sobre el aluminato tricálcico (C_3A) y el ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) formando etringita ($\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$) la cual es un producto expansivo del tipo AFt..



El sulfato de magnesio (MgSO_4) es el que produce un mayor daño a la mezcla de concreto, en el mecanismo del sulfato de magnesio ocurre la migración de iones hidróxido hacia la superficie para producir brucita insoluble posteriormente ocurre la migración de iones sulfato hacia el interior para formar yeso, y en regiones más profundas y en menores cantidades también etringita. Los iones de calcio necesarios para la formación de estas fases son abastecidos por el hidróxido de calcio, una vez agotada esta fase se abastece de la fase C-S-H por lo que se genera una descalcificación del mismo, y por consecuencia la pérdida de resistencia y desintegración de la mezcla [41].



Teniendo en cuenta esta problemática, se han generado múltiples recomendaciones y normas que especifican ciertas características con las cuales debe contarse para adquirir un concreto durable y resistente a los sulfatos. Las características recomendables para reducir el ingreso de los sulfatos son: Baja permeabilidad y porosidad del concreto, y reducir la cantidad de C_3A debido a que este es susceptible a los sulfatos. Normalmente se emplean prácticas para reducir al mínimo el ataque de sulfatos, de acuerdo a la especificación ASTM C 150 existen cementos resistentes a los sulfatos, cemento (Tipo II y tipo V) [14] los cuales tienen un contenido moderado y bajo de aluminato tricálcico respectivamente; otra solución es la sustitución de una parte del cemento de la mezcla de concreto por cenizas volantes, y/o la reducción de la relación de agua/material cementante de la mezcla.

Con esto podemos obtener una baja permeabilidad en el concreto. Pero con la reducción de la relación agua cemento de la mezcla, debe tomarse en cuenta que esta no provoque posteriormente fisuras por contracción del concreto, inducida por el calor de hidratación de la pasta de cemento.

La pérdida de humedad del concreto durante el secado provoca contracciones. La contracción por secado y la contracción autógena producen agrietamiento debido a cualquier restricción interna o externa. Esto se puede reducir significativamente con la adición de aditivos reductores de la retracción los cuales disminuyen la tensión superficial del agua en los poros capilares del concreto. En etapas iniciales, las capas superficiales del concreto tienden a disminuir su humedad relativa por causa del contacto con el ambiente, esto provoca que el agua que se encuentra a mayor profundidad ceda el agua debido al efecto de capilaridad [43].

El uso de aditivos ha sido implementado en la industria del concreto con el fin de mejorar sus propiedades ya que estas pueden ser modificadas al agregar ciertos materiales a la mezcla de concreto. Los aditivos son sustancias que, añadidas al concreto, alteran sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido. Por su naturaleza, se clasifican en aditivos químicos y aditivos minerales. Entre los primeros se tienen, plastificantes, superplastificantes, incorporadores de aire, controladores de fraguado, entre otros [44]. Cada uno de estos especificados por diferentes normas de la ASTM. Entre los aditivos minerales se tienen principalmente: cenizas volantes, humo de sílice y escoria de alto horno entre otras. Cada uno de estos especificados por diferentes normas de la ASTM.

2.5.3 Interacción entre sulfato y cloruros

El ataque de sulfatos y cloruros son uno de los problemas que afectan la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, causando un daño gradual de las mismas, como ya se mencionó de forma previa, cada uno de estos iones presenta un efecto para propiciar el deterioro del mortero o concreto. Las sales de cloruro y sulfatos existen de manera concomitante en el suelo, ambientes marinos y aguas subterráneas, de tal forma que la presencia de estas dos sales puede causar el deterioro del concreto debido a la corrosión del acero de refuerzo y al ataque de sulfato. Los iones SO_3 y Cl^- reaccionan con el C_3A formando diferentes compuestos, en un ambiente donde se encuentran ambos iones, estos penetraran por difusión hacia el interior de la matriz de cemento expuesta, donde los sulfatos reaccionan preferentemente con C_3A para formar dos compuestos trisulfo-aluminato de calcio hidratado ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) y monosulfo-aluminato de calcio hidratado ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Mientras que los iones cloruro pasaran a través de la matriz de cemento propiciando la

despasivación de la barra de refuerzo, permitiendo que se genere corrosión por picadura. En el caso de presentarse estos iones de forma conjunta, el tipo de cemento juega un papel importante ya que entre menor sea el porcentaje de C_3A , mayor será el daño generado por los Iones Cl^- , de forma contraria si el porcentaje de C_3A aumenta, tanto sulfatos como cloruros quedaran enlazados con este producto, y el porcentaje de cloruros libres disminuirá, de tal forma que el deterioro por corrosión disminuye [45].

2.6. CURADO DEL CONCRETO

El curado es un factor muy importante para garantizar que las estructuras de concreto cumplan su rendimiento previsto y requisitos de durabilidad. El curado es un proceso que busca mantener saturado el concreto hasta que los espacios de cemento fresco, originalmente llenos de agua sean reemplazados por los productos de hidratación del cemento. El curado pretende controlar el movimiento de temperatura y humedad hacia dentro y hacia afuera del concreto. Busca también, evitar la contracción de fraguado hasta que el concreto alcance una resistencia mínima que le permita soportar los esfuerzos inducidos por esta. En la construcción, esto se logra a través de curado externo, aplicado después de la colocación y acabado de la mezcla [46]. Algunos de los métodos de curado normalmente utilizados son: curado con agua, por inmersión, haciendo uso de rociadores, utilizando coberturas como yute y tierra, arena o aserrín sobre el concreto.

2.6.1. Curado interno

Otro método utilizado recientemente es el curado interno. El American Concrete Institute (ACI) definió el curado interno como un método de suministro de agua a través una mezcla de cemento recién colocada mediante el uso de materiales con capacidad de retención de agua [47]. Es un método que tiene como propósito lograr una mayor hidratación del cemento y con esto el aumento de los productos de hidratación, [48]. Actualmente, existen dos métodos disponibles para el curado interno del concreto. El primer método consiste en utilizar polímeros súper absorbentes [49], ya que estas partículas pueden absorber una gran cantidad de agua durante la mezcla de concreto y formar grandes inclusiones que contienen

agua libre, evitando así la auto-deseccación durante la hidratación del cemento. El segundo método es la utilización de agregado de peso ligero (LWA por sus siglas en inglés) [50] que es utilizado con el fin de suministrar una fuente interna de agua, que puede reemplazar el agua consumida por la contracción química durante la hidratación del cemento. El agente de curado interno debe poseer la capacidad de absorción de agua y altos porcentajes de desorción de la misma.

2.6.2. Tecnología VERDiCT

Mientras que algunos métodos convencionales se han enfocado en la producción de matrices cementantes menos permeables mediante el uso de puzolanas y aditivos para mejorar el desempeño del concreto, se tienen muchas ventajas en el aumento de la durabilidad con el uso de acelerantes, retardantes, reductores de la retracción (SRA) entre otros, pero tienen como desventaja que modifican algunas propiedades en estado fresco. Recientemente D. P. Bentz [51], propuso el uso de agregado ligero como un vehículo para introducir soluciones o mezclas de aditivo con el objetivo de no afectar el comportamiento en estado fresco de la mezcla, como el uso de SRA, en su investigación compara el desempeño del agregado ligero y la diferencia de adicionar el aditivo a la mezcla o preparar una solución con la cual saturar el agregado ligero previo a la preparación de la mezcla, este término lo denominó con el acrónimo de FLAIR (Fine Lightweight Aggregates as Internal Reservoirs).

Posteriormente Dale P. Bentz [52] propuso un método basado en el método FLAIR, pero con el nombre de VERDiCT (Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology), la cual consiste en introducir en mezclas de mortero y concreto, aditivos modificadores de la viscosidad comercialmente disponibles como SRA. Respecto a su trabajo, hizo investigación sobre morteros, con agregado ligero saturado en una solución de 50% de un aditivo reductor de la retracción (modificador de la viscosidad) en 50% agua. Con el objetivo de disminuir la difusión de agentes químicos, para aumentar la viscosidad de la solución de poro, El principio de esta tecnología se basa en una ecuación que dice que la difusión de un electrolito es inversamente proporcional a la viscosidad de la solución. Esta ecuación es la de Stokes-Einstein [53]:

$$D_o = \frac{K_b T}{6\pi\eta_0 r}$$

Donde:

D_o es el coeficiente de difusión propio de un ion, kB es la constante de Boltzmann, T es la temperatura, r es el radio de la partícula que se difunde y η es la viscosidad de la partícula que se difunde. Esta relación sugiere que si uno aumenta la viscosidad del fluido se tendrá una disminución en el coeficiente de difusión de especies iónicas.

CAPITULO 3. ANTECEDENTES

La formación de etringita se considera que es la causa de la expansión de las estructuras de concreto en la que interviene el ataque por sulfatos, es un tema que ha sido abordado desde diferentes puntos de vista por varios investigadores los cuales han realizado y empleado diferentes métodos para dar solución a esta problemática, entre los cuales destacan:

Kumar Metha. et al. que desde 1973 han ido estudiando el mecanismo de reacción entre los productos de hidratación del cemento y los sulfatos provenientes del medio ambiente. Hacen una revisión de varias hipótesis sobre el mecanismo de expansión asociada a la formación de etringita. Lo que da pie para que otros investigadores busquen alternativas para dar solución a esta problemática [54].

H. La Jara Santos. presento resultados del comportamiento de cementos portland frente al ataque por sulfatos, utilizando dos métodos: Uno normalizado (ASTM C 452) y otro no normalizado, por curado al vapor e inmersión respectivamente en solución de sulfatos de los especímenes de prueba, los resultados de ambos métodos afirman que los cementos con bajo contenido de C_3A tienen un mejor desempeño frente al ataque por sulfatos. La expansión obtenida con el método de Curado al Vapor logró valores más altos y en menor tiempo que con el método ASTM C 452. Por lo tanto, el método de Curado al Vapor e inmersión en solución de sulfato, puede ser una alternativa útil para evaluar el desempeño por su rapidez y facilidad [55].

E.E. Hekal. et al. Abordo sobre el uso de cemento en combinación con materiales MCS, donde describen la resistencia de pastas de cemento portland con adición de escoria, humo de sílice y carbonato de calcio. Las cuales se prepararon utilizando una relación a/c de 0.3. Colocadas en inmersión de 10% de solución de sulfato de magnesio, en condiciones diferentes (temperatura ambiente a 60 ° C y ciclos de secado e inmersión a 60° C. dedujeron que el reemplazo parcial de cemento portland por humo de sílice (10-15%) no mostró una mejora en la resistencia a los sulfatos de las pastas de cemento endurecido, mientras que las pastas con un contenido 40% de escoria o 5% carbonato de calcio mostraron una alta resistencia a los sulfatos en comparación con las pastas de 100% CPO. Y que la exposición

a la solución de sulfato a 60 ° C con ciclos de secado de inmersión puede ser considerada un método acelerado para el ataque del sulfato [56].

Monteiro P. et al. Realizaron pruebas para determinar la influencia de una variedad de parámetros en concreto premezclado para evaluar la resistencia a condiciones graves de exposición a sulfatos, considerando como parámetros la relación a/c, la composición de cemento y la sustitución de un porcentaje de cemento por cenizas volantes. Encontraron que la vida útil disminuye con el aumento la relación a/c y un alto contenido de C_3A del cemento. Determinaron que en las mezclas con una relación agua cemento inferior a 0,45 y con cemento con un contenido de C_3A de 8% o menos se obtuvieron mejores resultados a tiempos prolongados. Además, que la sustitución de cemento por ceniza volante en un rango de 25-45% resulta en mejoras considerables en la resistencia al ataque por sulfatos [39]

Jin Zuquan. et al. Llevaron a cabo investigaciones donde determinaron la interacción entre ataque por sulfatos y ataques por cloruros en concretos con y sin cenizas volantes. Hicieron un conjunto de concreto sin ceniza volante y otro con un 20 % y 30% de adición de cenizas volantes respectivamente, se usaron tres tipos de soluciones: 3,5% de NaCl, 5% de Na_2SO_4 y una solución compuesta de ambos. Se usaron dos métodos para inducir la corrosión, por inmersión total y ciclos de inmersión y secado. El efecto sinérgico del sulfato y el cloruro a exposiciones tempranas es que la presencia de sulfato disminuirá la concentración de cloruro de un 30 a 60% pero en exposiciones tardías la presencia del sulfato en solución aumentaba la penetración de cloruros. Las cenizas volantes aumentan la penetración de cloruro en periodos de exposición temprana, pero la redujo en periodos de exposición tardía [45].

Thokchom, S. et al. Una investigación fue llevada a cabo para estudiar el desempeño de especímenes de geopolímeros basados en ceniza volante en morteros dichos especímenes fueron hechos con ceniza volante baja en calcio con una activación por medio de una solución de hidróxido de sodio y silicato de sodio los especímenes fueron atacados por una solución de 10% de sulfato de magnesio por 24 semanas. Se apreciaron depósitos blancos en la superficie de los especímenes durante la exposición a la solución de sulfato de magnesio, no se encontraron grietas visibles, pero microgrietas fueron observadas en algunos especímenes a través de microscopio óptico, se aumentó considerablemente el pH atribuido a la migración

de álcalis del espécimen a la solución. Los especímenes con mayor contenido de álcali se comportaron mejor que aquellos con menor contenido de álcali [57].

G. P. William. Hizo un estudio donde se realizaron inmersiones de muestras de concreto con agregado reciclado en una solución de sulfato del 5%, teniendo como variables el porcentaje de reemplazo de agregados, la relación agua/material cementante y reemplazo con cenizas volantes. Realizando muestras para determinar las resistencias de cada una de las variables a estudiar, y comparar las muestras curadas en la solución de sulfatos con las que se curaron en inmersión. Obteniendo como resultado mayor expansión en las muestras con mayor relación a/c, pero en la mayoría de los casos disminuía con la incorporación de ceniza volante, mientras que en las mezclas con menor relación a/c se evidenciaron menores expansiones, pero a su vez menores resistencias y menor manejabilidad del concreto en las muestras con adición de ceniza volante [58].

D. P. Bentz, et. al, afirman que se puede lograr el aumento de la vida de servicio del concreto estructural mediante el aumento de la viscosidad de la solución de poros por un factor de dos esto es debido a que la vida de servicio es directamente proporcional al coeficiente de difusión de iones tales como cloruros o sulfatos. Este estudio da un nuevo enfoque en cuanto a la utilización de nanopartículas. Las aplicaciones de la nanotecnología al concreto se habían centrado anteriormente en la adición de nanopartículas a la matriz solida pero este estudio indica que la nanoingeniería de la solución de poro también puede ofrecer beneficios sustanciales [59].

D. P. Bentz, et. al ,Continuo con su investigación pero extendiéndola a cuantificar el rendimiento de uno de estos aditivos en morteros mediante la medición de la profundidad de la penetración de iones cloruro en mezclas cilíndricas expuestas, observo reducciones significativas en la profundidad de penetración en un año de exposición utilizando el modificador de la viscosidad en adición convencional en el agua de mezcla, pero el mejor rendimiento obtenido fue introduciendo la solución del modificador en los agregados ligeros finos pre humedecidos que posteriormente se agregan al mortero [60].

D. P. Bentz, et. al En un artículo publicado en el presente año realizaron estudios para evaluar un método para aumentar la resistencia de morteros al ataque de sulfatos. Utilizando un

reductor de la retracción (modificador de la viscosidad) en combinación con un agente de curado interno el cual fue pre humedecido con una solución 50:50 de un químico que modifica la viscosidad en agua, para proporcionar agua de curado adicional para incrementar la hidratación del cemento, por lo que obtuvieron resultados favorables que serán de utilidad para reducir la velocidad de la entrada de sulfatos del medio ambiente [61].

3.1. JUSTIFICACIÓN

Debido a la importancia del estudio de la durabilidad de las estructuras de concreto en el medio de la construcción, ha surgido la necesidad de seguir realizando investigaciones en cuanto a la problemática del ataque de agentes químicos a los cuales son susceptibles. Una de las principales problemáticas es la permeabilidad de la pasta de concreto, ya que, debido a esta, se presenta el ingreso de agentes agresivos que se encuentran en el medio ambiente tal como los iones sulfato cuyo mecanismo produce deterioro de las propiedades físicas y mecánicas del concreto, disminuyendo tanto la durabilidad como vida útil de las estructuras.

Desde hace tiempo se ha venido estudiando este problema por lo que han sido aplicados diferentes métodos para reducir el ingreso de sulfatos, sugeridos por diferentes investigadores, que incluyen, por ejemplo, la utilización de cementos resistentes a los sulfatos y algunas normativas que solo se enfocan a morteros. Recientemente se ha desarrollado una tecnología que involucra la técnica de curado interno junto con la inclusión de un aditivo reductor de la retracción para incrementar la viscosidad de la solución de poro y en consecuencia reducir la permeabilidad, la cual ya ha sido probada con éxito tanto en experimentos de laboratorio como de campo pero para disminuir el ingreso de iones cloruro en morteros como en concreto, de igual manera esta misma tecnología fue aplicada en morteros con el fin de observar el comportamiento de la tecnología para reducir el ingreso de sulfatos por lo que se obtuvieron resultados satisfactorios.

De acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente en cuanto a la aplicación de esta tecnología, en esta investigación se evaluará su eficiencia aplicada en concretos, ya que hasta la fecha solo se ha probado en morteros y queda la duda de su posible extrapolación entre un material y otro.

3.2. HIPÓTESIS

El aditivo reductor de la retracción, junto con el agente de curado interno mejorado (Tecnología VERDiCT), densificarán la matriz cementante, disminuyendo la permeabilidad, evitando el ingreso de los sulfatos y/o cloruros; y por lo tanto el aumento de la durabilidad del concreto.

3.3. OBJETIVOS

3.3.1. Objetivo general

Evaluar la calidad de la matriz cementante en distintas mezclas de mortero y concreto empleando una combinación de pumicita, un aditivo reductor de la retracción como curado interno, y ceniza volante. Con el fin de mejorar la calidad, disminuir la permeabilidad y reducir la entrada de los iones sulfato y/o cloruros; así como impactar en la durabilidad.

3.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la efectividad de la tecnología en morteros y concretos elaborados con cemento CPO 40 y un cemento resistente a los sulfatos TIPO V.
- Evaluar la efectividad de la tecnología en mezclas de mortero y concreto con una misma relación a/c.
- Evaluar la estabilidad dimensional (cambios de longitud) de los especímenes con respecto al tiempo de exposición.
- Evaluación de pruebas electroquímicas (E_{corr} e I_{corr}) de los especímenes con respecto al tiempo de exposición.
- Determinar las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) a diferentes edades de exposición (28, 56, 90 días) y compararlas con sistemas de control previamente establecidos.

CAPITULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el programa experimental el cual fue diseñado para llevar a cabo la ejecución de cada uno de los objetivos planteados en esta investigación. Este programa se encuentra conformado por una serie de pruebas que permitieron evaluar el comportamiento mecánico, químico y de durabilidad que presentaron las muestras con curado interno mejorado.

4.1. MATERIALES

A continuación, se hace una descripción de las características de los materiales que se emplearon para la elaboración de especímenes para esta investigación.

4.1.1. Cemento

Los cementos utilizados fueron un cemento portland ordinario (CPO 40), que cumple con la norma NMX C 414 [62] y un cemento resistente a sulfatos que es un cemento (Tipo V) que cumple con la norma ASTM C 150 [14]. En la Tabla 3 se muestran los resultados de la composición química obtenidos por fluorescencia de rayos X (FRX) de los cementos utilizados.

Tabla 3. Composición química de los cementos utilizados.

Compuesto	Cemento CPO 40	Cemento Tipo V
	(% en peso)	(% en peso)
SiO ₂	17.68	17.87
Al ₂ O ₃	4.93	3.53
Fe ₂ O ₃	3.33	5.28
CaO	63.17	67.93
MgO	1.13	1.37
SO ₃	3.21	3.28
Na ₂ O	0.25	-
K ₂ O	0.84	0.29
TiO ₂	0.22	0.28
SrO	-	0.09
MnO	0.12	0.04

4.1.1.1 Densidad

Las densidades de los cementos utilizados fueron evaluadas de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C 188 [63] para densidad de cemento hidráulico. Obteniendo una densidad de 3.12 kg/cm^3 para el cemento CPO 40 y de 3.13 kg/cm^3 para el cemento Tipo V.

4.1.1.2 Distribución de tamaño de partícula (DTP)

Es una técnica para obtener el tamaño de las partículas en materiales muy finos. En la Figura 5 y en la Figura 6 se observa que el tamaño de partícula de ambos cementos es relativamente similar, con una distribución entre 1 y $100 \mu\text{m}$ y una media de aproximadamente $20 \mu\text{m}$.

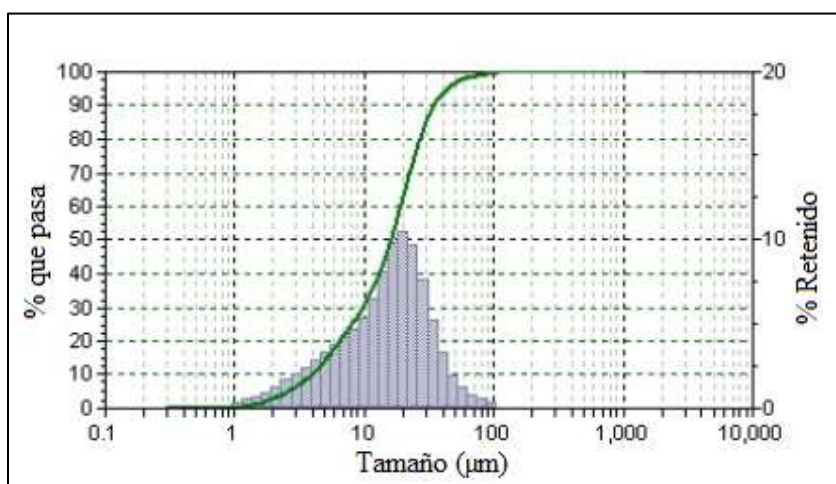


Figura 5. Distribución de tamaño de partícula del cemento CPO 40.

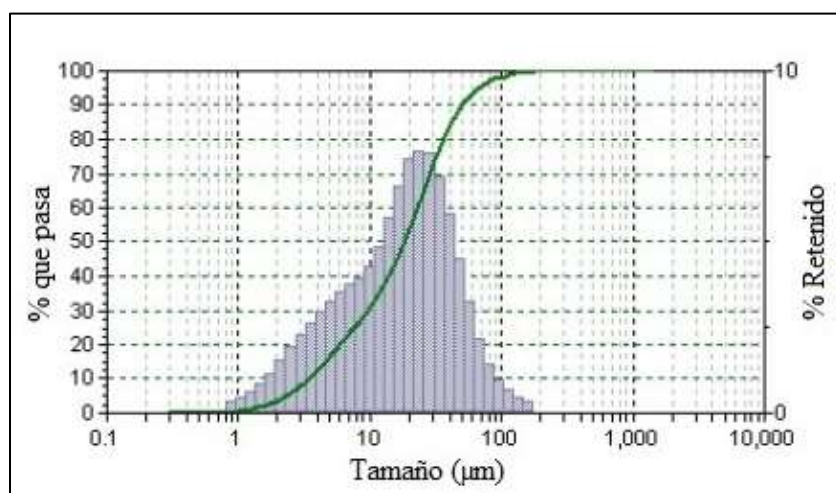


Figura 6. Distribución de tamaño de partícula del cemento tipo V.

4.1.2. Ceniza Volante

La ceniza volante (CV) empleada en esta investigación se utilizó tal cual sin ningún tipo de acondicionamiento, es una ceniza volante tipo F de acuerdo a la norma ASTM C 618 [64]. La cual es normalmente producida por la quema de antracita o carbón mineral bituminoso. La CV presentó las características mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Requerimientos para ceniza CV.

Compuesto químico	Clase	
	F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% min)	7.0	50.0
SO ₃ (% max)	5.0	5.0
Contenido de humedad (% max)	3.0	3.0
Perdida por ignición (% max)	6.0	6.0

La composición química de la ceniza volante fue evaluada por medio de FRX. En la Tabla 5 se muestra su composición química en la cual la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ supera el límite del 70 % especificado en la Tabla 4. Por lo tanto, cumple con los requerimientos establecidos en la normativa en cuanto a la clasificación de la Ceniza Volante F.

Tabla 5. Composición química de la CV.

Compuesto	Contenido (%)
SiO ₂	56.36
Al ₂ O ₃	32.89
Na ₂ O	3.50
MgO	1.75
Fe ₂ O ₃	1.54
CaO	0.71
K ₂ O	0.53
TiO ₂	0.36
SO ₃	0.30

4.1.2.1. Densidad.

La densidad se evaluó siguiendo la normativa estándar ASTM C 188 y ASTM C 311 [65] y cuyo resultado arrojó una densidad de 2.1 g/cm³.

4.1.2.2. Distribución de tamaño de partícula.

Al igual que los cementos, a la CV se le realizó un análisis para observar la distribución de las partículas y obtener el tamaño promedio de las mismas, dicha distribución se muestra en la Figura 7. Y cuyo tamaño promedio oscila entre 70 y 100 micras.

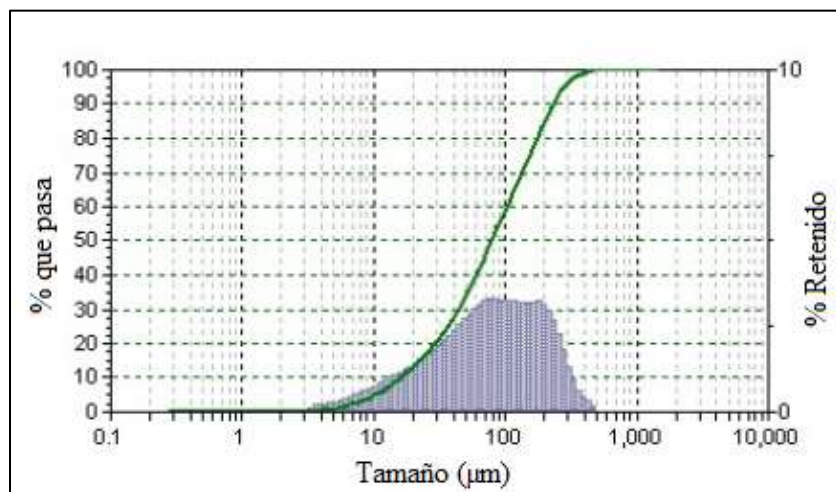


Figura 7. Distribución de tamaño de partícula de la CV.

4.1.3. Agregados

En esta investigación se hizo uso de tres tipos de agregado para la elaboración de las mezclas. De esta forma, a continuación se hace una breve descripción de cada agregado y su respectiva caracterización.

4.1.3.1. Agregado grueso.

El agregado grueso utilizado fue de tipo calizo, con un tamaño máximo de 19 mm (3/4”), extraídos de la región del estado de Nuevo León y cuya composición es principalmente carbonato de calcio. La granulometría se obtuvo mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C 136 [66] y su distribución se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Granulometría del agregado grueso.

Malla	(%) Retenido	(%) Pasa
1”	0	100
3/4”	7.8	92.2
3/8”	69.4	22.8
N° 4	17.5	5.3
N° 8	0.8	4.5
Pasa	4.5	0.0

4.1.3.2. Agregado fino

En esta investigación se utilizaron dos tipos de agregado fino, un agregado de tipo calizo al igual que el agregado grueso y un agregado fino pumicita.

4.1.3.2.1. Agregado fino de caliza.

El agregado fino empleado fue de una composición mayormente constituida por carbonato de calcio (piedra caliza) y fue utilizado como se encontraba en la zona metropolitana de Monterrey, sin proporcionarle ningún tratamiento adicional.

4.1.3.2.2. Agregado ligero (pumicita).

La pumicita es una piedra de origen volcánico, la cual posee características y propiedades de acuerdo a su origen como la gran cantidad de poros. Su porosidad le permite absorber y retener el agua, además de hacerla ligera y otorgarle condiciones particulares, especialmente para el filtrado de productos de elaboración industrial. El agregado ligero empleado en esta investigación es una pumicita triturada, disponible en la zona metropolitana de Monterrey.

A este agregado se le realizó la prueba de densidad, absorción y desorción, así como el cálculo del porcentaje de sustitución por agregado fino siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C1761. por lo cual la sustitución por agregado fino fue del 21% en volumen.

Las siguientes tablas presentan la distribución de los agregados finos y una comparación con las propiedades recomendadas en la norma ASTM C33 [67] ver Tabla 7 y las características físicas de los agregados ver Tabla 8.

Tabla 7. Granulometría del agregado Fino (calizo) y agregado ligero (pumicita).

Malla	Agregado Fino (caliza)		Agregado ligero (pumicita)	
	(%) Retenido	(%) Pasa	(%) Retenido	(%) Pasa
3/8"	0	100	0	100
No 4	0	100	0	100
No 8	18.5	81.5	21.7	78.3
No 16	29.9	51.6	23.6	54.7
No 30	18.5	33.1	13.0	41.7
No 50	10.5	22.6	5.4	36.2
No 100	5.9	16.7	4.7	31.5
No 200	3.2	13.5	9.2	22.3
pasa	13.5	0	22.3	0

Adicionalmente, en la Figura 8 se muestran los límites de comparación de las propiedades recomendadas por la norma ASTM C 33.

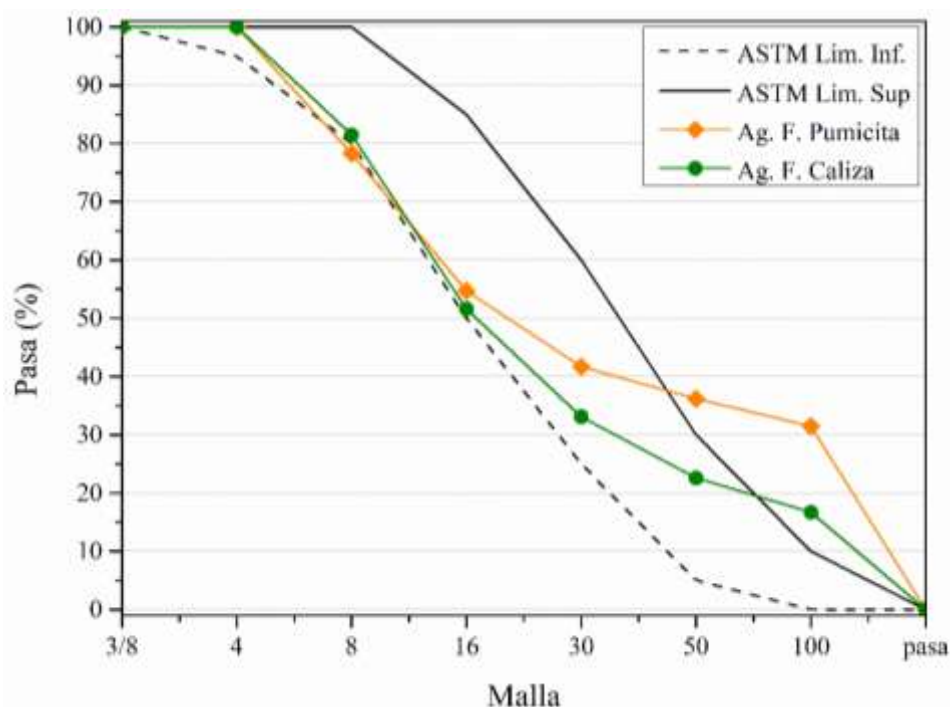


Figura 8. Comparación granulométrica de los agregados finos.

4.1.4. Características físicas de los agregados

4.1.4.1. Peso volumétrico.

El peso volumétrico es un parámetro importante para el diseño de la mezcla debido a que nos indica la masa del material presente en un metro cúbico; este se obtuvo mediante la norma ASTM C29 [68].

4.1.4.2. Absorción.

La absorción del agregado grueso se analizó utilizando los parámetros estipulados en la norma ASTM C127 [69], y el agregado fino mediante la norma ASTM C128 [70]. Este parámetro es importante para conocer la capacidad de absorción de agua de los agregados, para de esta manera tomarla en cuenta y adicionarla a la mezcla para no afectar el contenido de agua.

4.1.4.3. Densidad.

La densidad del agregado se obtuvo mediante la norma ASTM C128 para agregado grueso y ASTM C127 para agregado fino. Esta medición consideró el peso del material por metro cúbico excluyendo los vacíos entre agregados, esto se llevó a cabo mediante la saturación del agregado por 24 horas y secándolo superficialmente para obtener el peso saturado superficialmente seco (SSS) y la densidad por medio de un picnómetro.

Para la evaluación de la densidad, se tuvo especial cuidado, al igual que en la prueba de absorción, ya que el material puede pasar rápidamente del estado sobre saturado al insaturado y la condición de importancia es su estado en (SSS).

4.1.4.4. Desorción.

La desorción nos permite conocer el agua que se puede liberar de un material, esta depende de las características del material, tamaño de poro, granulometría, humedad relativa del ambiente en el que se encuentra el material y la temperatura, etc. De esta manera, para conocer la cantidad aproximada del agua obtenida del material suministrado al concreto, en sustitución de agregado fino de peso normal, se realizó esta prueba en el laboratorio por medio del uso de una cámara ambiental. La norma que describe el procedimiento es la ASTM C1761 [71]. En la Tabla 8 se muestran las características físicas de los agregados, las cuales fueron requeridas para el diseño de las mezclas.

Tabla 8. Características físicas de los agregados.

Agregado	Peso volumétrico (kg/m³)	Densidad (%)	Absorción (%)	Desorción (%)
Grueso	1640	2.7	0.4	
F. Caliza	1710	2.6	1.9	
F. Pumicita	852	2.1	31.1	54.0

4.1.5. Agua.

El agua utilizada para la elaboración de las mezclas de concreto fue agua potable, la cual es aceptable para concretos.

4.1.6. Aditivos.

En esta investigación se hizo uso de un aditivo reductor de la retracción en la pre saturación del agregado, que sirvió como conducto para el curado interno de la mezcla: Masterlife SRA

20 (SRA). Algunos de los datos proporcionados fueron la dosificación de 1.0 a 2.5% del cementante, además de un posible incremento de la velocidad de sangrado (10% más), retraso en el tiempo de fraguado dependiente de la dosificación y la temperatura. Es un aditivo base éter alquil polioxialquilenos, el cual es un surfactante y es empleado para reducir la tensión superficial y como un aditivo para modificar la viscosidad en una solución, utilizando 50% de este aditivo y agua destilada para saturar el agregado ligero [72].

4.1.7. Acero.

Para la elaboración de los especímenes para mediciones de pruebas electroquímicas se utilizaron dos tipos de acero, para las probetas de mortero se utilizó varilla de 1/4" (6.36 mm) de diámetro, y para las probetas de concreto se utilizó una varilla de 3/8" (9.5 mm) de diámetro. Las características de las varillas cumplen con las especificaciones establecidas en la norma NMX- C-407- ONNCCE (ver Tabla 9).

Tabla 9. Características del acero de refuerzo.

Varilla	Descripción					
	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Área de sección transversal (mm ²)	Perímetro (mm)	Resistencia a tensión mínima (kg/mm ²)	Esfuerzo de fluencia mínimo (kg/mm ²)
1/4"	6.35	0.248	31.7	20.0	63	42
3/8"	9.50	0.560	71.0	29.8	60	52

Antes de la elaboración de especímenes las varillas se prepararon realizando la limpieza (decapado) de las mismas, para eliminar la capa de óxido que se forma en la superficie de las barras de acero. La capa de óxido fue removida sumergiendo las barras de acero en una solución de ácido clorhídrico siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM G1 [73]. Posteriormente fueron recubiertas con pintura epóxica, dejando sin recubrir únicamente el área que fue atacada por los iones cloruro y el área por la cual se realizaron las mediciones de las pruebas electroquímicas.

4.2. DISEÑO DE MEZCLAS

Para la evaluación de la efectividad del curado interno mejorado, se llevaron a cabo 4 diseños de mezclas, de acuerdo a las características que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Nomenclaturas asignadas a los diferentes tipos de mezclas.

Mezcla	Nomenclatura	Descripción
I	Referencia	Mezcla de referencia
II	CV	Mezcla con 20 % ceniza volante en sustitución de una parte de cemento.
III	VERDiCT	Mezcla con tecnología VERDiCT
IV	VERDiCT-CV	Mezcla con tecnología VERDiCT y sustitución de 20% ceniza volante.

4.2.1. Resumen de mezclas.

Mezcla R. -Mezcla de referencia elaborada solo con agregados de peso normal, cemento y agua.

Mezcla CV. -Mezcla de referencia con una sustitución de 20% de cemento portland por ceniza volante CV.

Mezcla V. -En esta mezcla se utilizó el método VERDiCT donde se sustituyó 21% de agregado fino de peso normal por agregado ligero saturado en una solución de 50:50 aditivo reductor de la retracción en agua destilada.

Mezcla V-CV. -Mezcla con sustitución de cemento por 20% de ceniza volante, además de implementar el curado interno con agregado ligero saturado en solución al igual que la mezcla V.

Dependiendo del tipo de cemento del cual fueron elaboradas las mezclas se designó el número **1** para cemento CPO 40 y el número **2** para cemento Tipo V. y dependiendo de la solución a la cual fue expuesta cada una de las mezclas se anexaron las letras **a**, **b** y **c** a la nomenclatura propuesta; siendo a) $MgSO_4$, b) $MgCl_2$ y c) $MgSO_4 + MgCl_2$.

4.2.2. Mezclas

Se fabricaron mezclas de concreto y mortero en las cuales se utilizaron dos tipos de cemento portland (CPO 40 y Tipo V), agregado grueso, agregado fino, agregado ligero y ceniza volante (CV), los cuales fueron descritos previamente. Las mezclas se elaboraron con una relación $a/c = 0.485$, y un contenido de cemento de 443 kg/m^3 .

4.2.3. Preparación.

Para la elaboración de cada una de las mezclas se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

- Saturación del agregado ligero 72 horas antes de la elaboración de cada mezcla, que requería de la sustitución de agregado ligero.
- Obtención de la humedad de obra de los agregados el día de elaboración de cada mezcla para realizar correcciones por humedad, y no alterar la relación a/c establecida.
- Peso de cada uno de los materiales (grava, agregado fino, agregado, ligero, CV y agua) para la elaboración de mezclas.

4.2.4. Mezclado.

Para el mezclado de concreto se utilizó una revolvedora de capacidad de 40L, siguiendo los tiempos de mezclado establecidos en la norma ASTM C192 [74] y para morteros se hizo uso de una mezcladora con capacidad de 6L siguiendo los tiempos de mezclado establecidos en la norma ASTM C305 [75]. Después del término de cada mezclado se elaboraron los especímenes a utilizar para cada una de las pruebas en estado endurecido.

4.2.5. Colocación.

La colocación de cada mezcla se realizó en diferentes moldes, los cuales serán descritos a continuación.

4.2.5.1. *Concreto*

- Moldes metálicos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura para la elaboración de cilindros.
- Moldes metálicos de 7.5 cm de ancho por 7.5 cm de altura por 28 cm de largo para elaboración de barras para mediciones de cambios de longitud.
- Moldes metálicos de 7.5 cm de ancho por 7.5 cm de altura por 10 cm de largo, preparados con barras de acero de 3/8" para mediciones de pruebas electroquímicas.

El llenado de los moldes se realizó en dos capas y compactando 25 veces entre capa y capa con una varilla de punta redonda de 1/4", para finalmente enrazar con la misma varilla y dar acabado con una llana metálica.

4.2.5.1. *Mortero.*

- Moldes metálicos de 5 cm por 5cm para ensayos de pruebas mecánicas de resistencia a compresión.
- Moldes metálicos de 2.54 cm de ancho por 2.54 cm de altura por 28 cm de largo.
- Moldes metálicos de 2.54 cm de ancho por 2.54 cm de altura por 10 cm de largo, preparados con barras de 1/4".

El llenado de los moldes se realizó en dos capas y compactando 32 veces entre capa y capa con un neopreno, para finalmente enrazar con una espátula metálica [76]. Después del colocado de cada mezcla, los especímenes se conservaron en un cuarto de curado a una temperatura controlada de 23 ± 2 °C por 24 horas. Después del primer día, fueron retirados del molde para ser curados.

4.2.6. **Curado.**

De acuerdo a información previamente analizada por el grupo de trabajo, el curado se llevó a cabo por 10 días en contenedores llenos de agua saturada con cal, donde se mantuvieron todos los especímenes en inmersión, hasta alcanzar una resistencia de 20 MPa, a excepción de los especímenes de mezclas de referencia y mezclas con 20% ceniza volante, debido a que al ser desmoldados ya alcanzaban la resistencia necesaria para ingresar a las soluciones, para las posteriores mediciones de pruebas de durabilidad.

4.3. MÉTODOS Y ENSAYOS

4.3.1. Técnicas de caracterización

A continuación, se describen las técnicas de caracterización más importantes utilizadas en este trabajo. Algunas de estas técnicas fueron utilizadas para la caracterización de los materiales de partida en la investigación.

4.3.1.1. Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Mediante esta técnica es posible obtener imágenes más claras y de alta resolución comparadas con los microscopios ópticos. Esta técnica se basa en hacer coincidir un haz de electrones primarios (EP), condensado por lentes magnéticas en forma de un punto de entre 5-100 nm de diámetro. Al chocar con un cuerpo sólido (muestra), los electrones son reflejados (dispersados) o absorbidos, y producen varias señales. En la Figura 9 se representan los electrones secundarios (ES), electrones retro dispersados (ERD), rayos-X, electrones de Auger (EA) y otras respuestas [77,78].

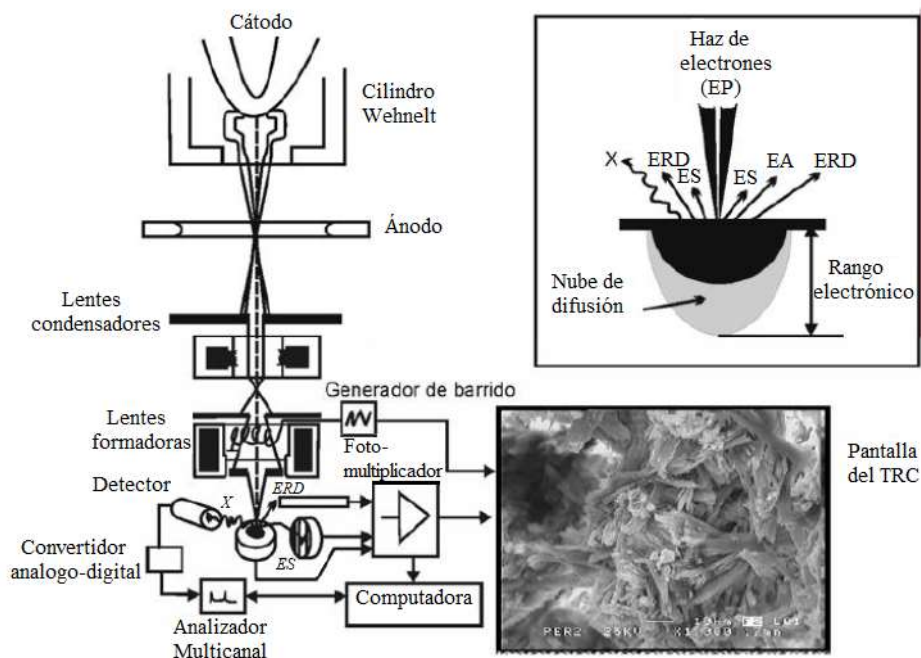


Figura 9. Funcionamiento del Microscopio Electrónico de Barrido [79].

Esta técnica de caracterización fue empleada para conocer la morfología de la materia prima (polvos) utilizada en la investigación. El equipo empleado fue un microscopio electrónico de barrido, modelo JSM-6490LV de la marca JEOL.

4.3.1.2. *Fluorescencia de rayos X (FRX)*

Esta técnica de caracterización fue empleada para determinar la composición química en forma de óxidos de los materiales a utilizar en la investigación. En la técnica cuando una serie de rayos-X primarios, provenientes de una fuente radiactiva, golpean una muestra, los rayos-X pueden ser absorbidos por el átomo o dispersados a través del material. El proceso en el que los rayos-X son absorbidos por el átomo mediante la transferencia de la totalidad de su energía a un electrón de sus orbitales internos se llama “efecto fotoeléctrico”. Durante este proceso, si los rayos-X primarios tienen suficiente energía, los electrones son expulsados de los orbitales internos creando vacancias. Estas vacancias representan una condición inestable para el átomo. Cuando el átomo vuelve a su condición estable, los electrones de los orbitales exteriores se transfieren a los orbitales internos [80].

En esta caída o transición, se genera energía mediante emisión de un fotón. El valor de esta energía es igual a la diferencia de energía entre los dos orbitales involucrados. Por lo tanto, el material emite radiación cuya energía es característica de los átomos componentes del material. El término fluorescencia se usa para denominar el fenómeno por el cual la absorción de radiación de una energía específica genera reemisión de radiación de una energía diferente, generalmente menor [81]. Cada elemento posee orbitales electrónicos de energías características. El equipo utilizado para esta técnica fue un modelo Epsilon 3-XL, marca PANalytical.

4.3.1.3. *Difracción de rayos X (DRX)*

Hace ya más de un siglo desde que el fenómeno de la radiación-X fue descubierto por Wilhelm Conrad Roentgen. Pronto se supo que los rayos-X tienen longitudes de onda en el rango de angstroms, y que son lo suficientemente energéticas para penetrar sólidos y reconocer su estructura interna. En base a estos hallazgos, se han desarrollado y perfeccionado para su aplicación, herramientas y técnicas útiles para el análisis y evaluación de los materiales. La **DRX** es la dispersión elástica de fotones de rayos X por los átomos en una red periódica con interferencia constructiva [79]. La Figura 10 muestra cómo la difracción de los rayos-X a través de los planos cristalinos permite derivar espaciamientos de red mediante el uso de la ley de Bragg (7):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (7)$$

Donde:

n = es el orden de reflexión

λ = es la longitud de onda de los rayos-X

d = es el espaciamiento entre los planos de la muestra

θ = es el ángulo entre el haz incidente y la normal al plano de red de reflexión

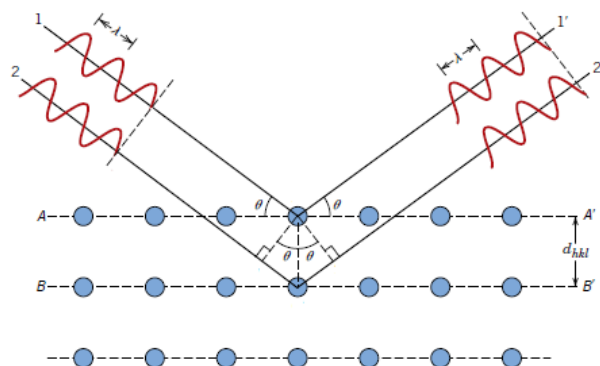


Figura 10. Representación gráfica de la ley de Bragg [82]

Con la medición de los ángulos θ bajo los cuales los rayos-x dejan el cristal, pueden ser determinados los espaciamientos interplanares d de cada fase cristalográfica. Con la ayuda de una lista de valores d y las intensidades relativas de las líneas de difracción es posible identificar una sustancia desconocida mediante la comparación de dichos datos con patrones estándar. Esta técnica de Difracción de rayos X fue empleada para determinar las fases y compuestos presentes de los materiales empleados en esta investigación. En esta técnica se utilizó un equipo Bruker D8 advance con detector Vantec.

4.3.1.4. Distribución de tamaño de partícula (DTP).

Es una técnica mediante la cual puede obtenerse el tamaño máximo y promedio de partícula de materiales muy finos (polvos). El principio de esta técnica es la difracción por rayos láser, que consiste en hacer pasar una muestra pulverizada, en seco o en suspensión en un líquido no reactivo (alcohol isopropílico), a través de un rayo láser monocromático. Según la teoría de Fraunhofer se origina una figura de difracción en el detector. De este modo se consigue obtener la distribución de tamaño de partícula en el rango indicado. El equipo empleado para llevar a cabo este análisis fue marca MICROTRAC modelo S3500. [83].

4.4. ENSAYOS Y PRUEBAS FISICO-MECANICAS

4.4.1. Propiedades en estado fresco del concreto

Las propiedades en estado fresco, se llevaron a cabo inmediatamente después de finalizar el mezclado, con la finalidad de verificar que cada una de las mezclas cumplan con las características de diseño establecidas. A continuación, se describen cada una de las pruebas realizadas para evaluación de propiedades en estado fresco.

4.4.1.2. Revenimiento

El propósito de esta prueba es determinar la consistencia del concreto a través de su capacidad para fluir. El revenimiento de las mezclas de concretos se llevó a cabo mediante las especificaciones descritas en la norma ASTM C 143 [84]. La Figura 11 muestra la prueba de evaluación de la consistencia de la mezcla de concreto elaborada.



Figura 11. Prueba de revenimiento para concreto.

4.4.1.3. Peso volumétrico.

Es una herramienta importante para controlar la calidad del concreto recién mezclado, el peso volumétrico es un parámetro que sirve para verificar la uniformidad de la mezcla, si el valor cambia mucho, esto indica que algunos de los ingredientes del concreto han cambiado en su proporción o características. Esta prueba se realizó por medio de una tina, de acuerdo a la norma ASTM C138 [85] con el fin de ver el efecto y la relación de los materiales utilizados con el peso por metro cúbico del concreto. Figura 12.



Figura 12. Prueba de peso volumétrico.

4.4.1.4. Contenido de aire.

El contenido de aire se evaluó mediante el método de presión (ver Figura 13)-. Por medio de este método se puede determinar el contenido de vacíos atrapados en la mezcla en estado fresco, determinando el aire tanto inducido como atrapado. Esta prueba se realizó bajo especificaciones de la norma ASTM C231 [86].



Figura 13. Prueba de contenido de aire para mezclas de concreto.

4.4.2. Propiedades en estado fresco del Mortero.

4.4.2.1. Fluides

La consistencia de un mortero es una propiedad en estado fresco, y sirve para evaluar la facilidad de colocación de la mezcla. Esta prueba se realizó en una mesa de fluides (ver Figura 14), mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM C1437 [87].



Figura 14. Prueba de revenimiento para mortero.

4.4.2.2. Contenido de Aire

El contenido de aire de las mezclas de mortero se determinó bajo especificaciones de la norma ASTM C185, ver Figura 15 [88]. El propósito de esta norma es determinar si el cemento hidráulico bajo ensayo, cumple o no con los requisitos de incorporación o no incorporación de aire, de la norma aplicable para cemento.



Figura 15. Prueba de contenido de aire para mortero.

4.4.3. Propiedades en estado endurecido del concreto y mortero.

Las propiedades en estado endurecido nos permiten conocer la calidad de las mezclas con las cuales fueron elaborados los especímenes, mediante una serie de pruebas que se describen a continuación. Estas pruebas permitirán observar el comportamiento de estas mezclas con respecto al tiempo de exposición.

4.4.3.1 Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión es una prueba física muy común para materiales cerámicos debido a que este tipo de materiales presentan fallas frágiles a tensión; además sirve como un indicador de la calidad de la mezcla en estado endurecido, ligada a la durabilidad. En esta investigación esta prueba nos proporciona información sobre la calidad de las distintas mezclas por la sustitución de agregado fino por el agregado ligero y sustitución del cemento por CV en proporciones definidas. La norma utilizada en este procedimiento es la ASTM C39 [89] para muestras de concreto y ASTM C109 [76] para muestras de mortero. Esta prueba se llevó a cabo en una máquina Instron modelo 600 DX con capacidad de 60 ton. La Figura 16 y la Figura 17 muestran un ejemplo del ensaye a compresión de muestras de concreto y mortero respectivamente.



Figura 16. Ensayo de resistencia a compresión concreto.



Figura 17. Ensayo de resistencia a compresión de mortero.

El cálculo de la resistencia a compresión resulta de:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde: f_m = Resistencia a compresión en psi o MPa.

P = Carga máxima en N.

A = Área donde se aplica la carga en mm^2 .

4.5. PRUEBAS DE DURABILIDAD.

Los siguientes ensayos se realizaron para evaluar el comportamiento de especímenes tanto de mortero como concreto, frente al ingreso de agentes químicos presentes en las diferentes soluciones de prueba. Además de conocer el estado del acero de refuerzo embebido en las probetas que fueron elaboradas para determinar la efectividad de cada mezcla.

4.5.1. Ambientes de exposición

Posterior a los 10 días de curado previos en agua saturada con cal a excepción de las probetas de referencia que al desmoldar alcanzaban la resistencia necesaria para ingresar en solución, los especímenes, ingresaron a sus respectivos ambientes de exposición. Para conocer el comportamiento de cada una de las mezclas diseñadas, se requirió de una solución de 5% de sulfato de magnesio (MgSO_4), 3.5% de cloruro de magnesio (MgCl_2) y una combinación de ambas soluciones. Para la evaluación de cada mezcla en el ambiente de exposición se realizaron las siguientes pruebas: cambios de longitud para los especímenes expuestos a solución de MgSO_4 y mediciones de pruebas electroquímicas en los especímenes expuestos a solución de MgCl_2 .

4.5.2. Cambios de longitud.

Una de las propiedades importantes a considerar en los morteros y concretos son los cambios de longitud. En el presente estudio se evaluó la variación en el cambio de longitud de los morteros y concretos elaborados. Las probetas fueron elaboradas y monitoreadas de acuerdo a especificaciones marcadas en la norma ASTM C-1012 [90], en moldes de 2.54 x 2.54 cm de sección y 28.7 cm de largo para mortero y moldes de 7.5 x 7.5 cm de sección y 28.7 cm de largo para concreto. Por el centro de cada extremo de la barra, se anclaron unos tornillos de acero los cuales se fijaron en el molde para permanecer embebidos en los especímenes de mortero y concreto, como se muestra en la Figura 18.

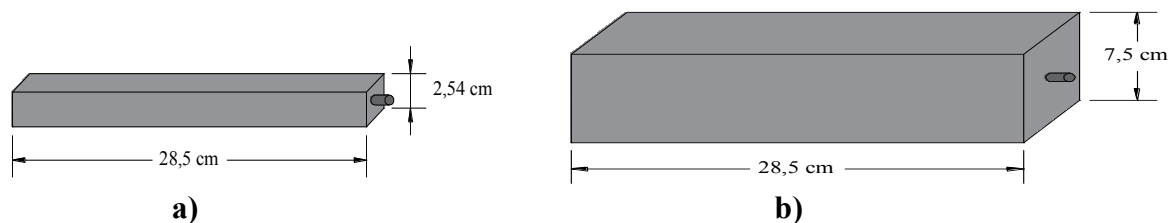


Figura 18. Probetas para cambios de longitud a) mortero y b) concreto.

Para la medición de la variación de longitud, se empleó un comparador de longitudes con micrómetro, con las características indicadas en la norma ASTM C-157 [91]. La primera medida se realizó después del curado y antes de ingresar en solución (L_1) y las medidas posteriores se realizaron a las 1, 2, 3, 4, 8, 13, 15, 16, 20 semanas (L_2). Antes de cada medida, el comparador de longitudes se calibra con una barra metálica de 250 mm de longitud, ver Figura 19.

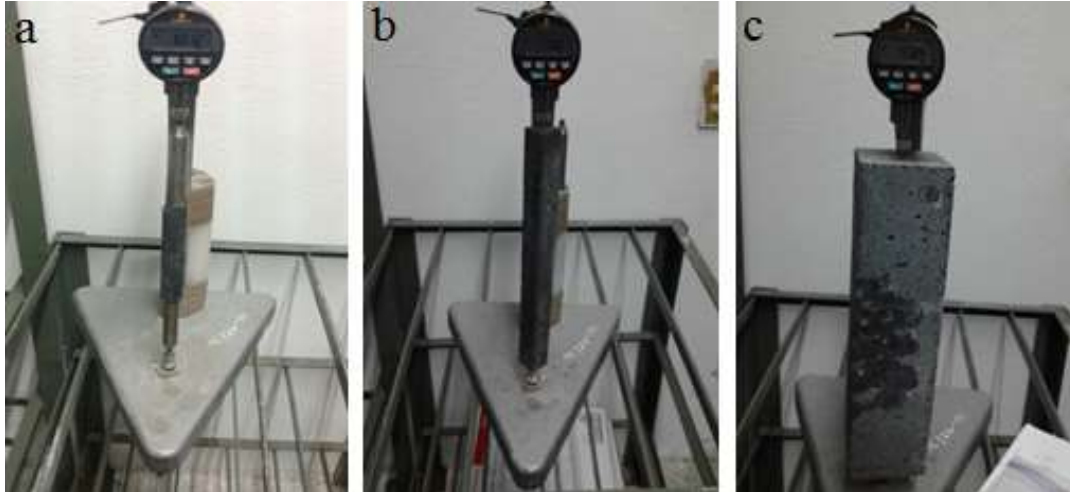


Figura 19. a) Medición de la barra de calibración, b) Medición de la barra de mortero, c) Medición de la barra de concreto.

La variación de los cambios de longitud (Expansiones) de cada barra se calcula mediante la siguiente formula:

Siendo: Δ_L = Cambio de longitud a la edad X, %

L_x = lectura en el comparador del espécimen a la edad x, menos la lectura de la barra de referencia a x edad en el comparador.

$$\Delta_L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100$$

L_i = lectura inicial del espécimen en el comparador, menos la lectura en el comparador de la barra de referencia, al mismo tiempo.

L_g = longitud nominal de calibración, o 250 mm, según corresponda.

4.5.3. Pruebas Electroquímicas

Los análisis electroquímicos como (potenciales y velocidades de corrosión) son de utilidad ya que nos permiten conocer el estado en el que se encuentra el acero de refuerzo. Definir el periodo de tiempo durante el cual se presenta la corrosión en el acero, en qué periodo de tiempo pasa del periodo de iniciación al periodo de propagación, es decir, el tiempo que tardan los cloruros (Cl^-) en llegar al acero dependiendo de la calidad de cada mezcla de mortero y/o concreto. Las medidas de potenciales (E_{corr}) y velocidades (I_{corr}) de corrosión se miden por medio de un potenciostato, empleando una técnica no destructiva llamada resistencia a la polarización (RP), en la que por medio del potenciostato se aplica un potencial al acero, y por medio de su resistencia a cambiar su potencial de equilibrio se determina un potencial y una velocidad de corrosión producido en el acero. Se empleó un equipo Gamry interface 1000.

4.5.3.1. Potenciales de corrosión (E_{corr}).

Se emplean debido a que proporcionan información sobre cuando se presenta corrosión en el acero de refuerzo observando una caída en el potencial llamada potencial de corrosión. La medida del potencial de corrosión es un método cualitativo sobre la pasivación del acero, es decir si se está presentando o no el efecto de corrosión. La norma ASTM C-876 [92] indica el procedimiento adecuado para la realización de la prueba, así como los rangos de potenciales y la probabilidad de que se presente corrosión (ver Tabla 11).

Tabla 11. Probabilidad de presencia de corrosión por rangos de E_{corr} .

E_{corr} vs Cu/CuSO ₄ (mV)	E_{corr} vs Hg/Hg ₂ SO ₄ (calomel) (mV)	Condiciones de corrosión
> -200	> -120	10% de que se presente
-200 a -350	-120 a -270	Zona incierta
< -350	< -270	90% de que se presente
< - 500	< - 380	Corrosion severa

4.5.3.2. Velocidad de corrosión (I_{corr}).

La velocidad de corrosión nos indica que tan rápido se están desarrollando las reacciones de corrosión en las probetas. Los resultados de esta prueba están correlacionados con el área superficial del acero en exposición. En este proyecto, el área expuesta es de 5 cm^2 . En la Tabla 12 se muestran las consideraciones del estado de corrosión de acuerdo a la I_{corr} . La Figura 20 muestra un ejemplo de la medición de las probetas utilizadas y la Figura 21 y Figura 22 muestran un esquema del diseño de las probetas elaboradas de mortero y concreto respectivamente.

Tabla 12. Estado del acero con respecto a la I_{corr} [93].

$I_{corr} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
$0.1 - 0.5$	Moderado
$0.5 - 1$	Elevada
> 1	Muy elevada

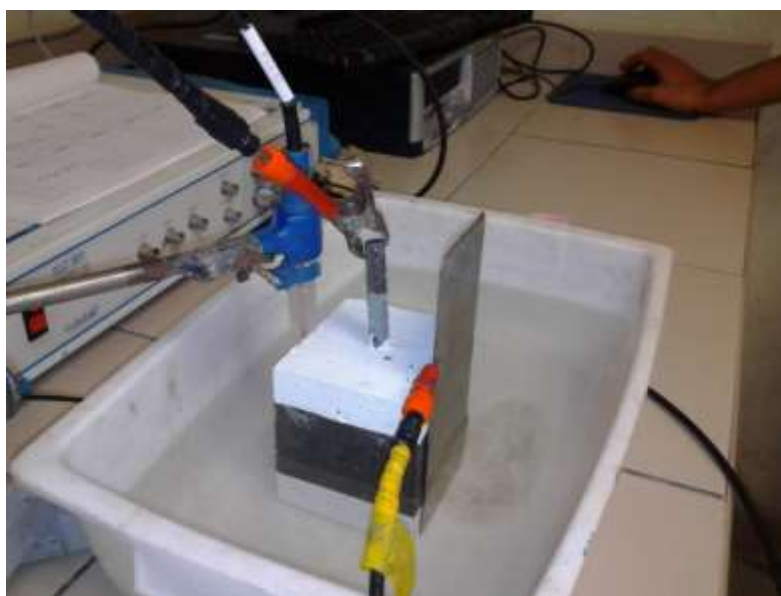


Figura 20. Medición de pruebas electroquímicas.

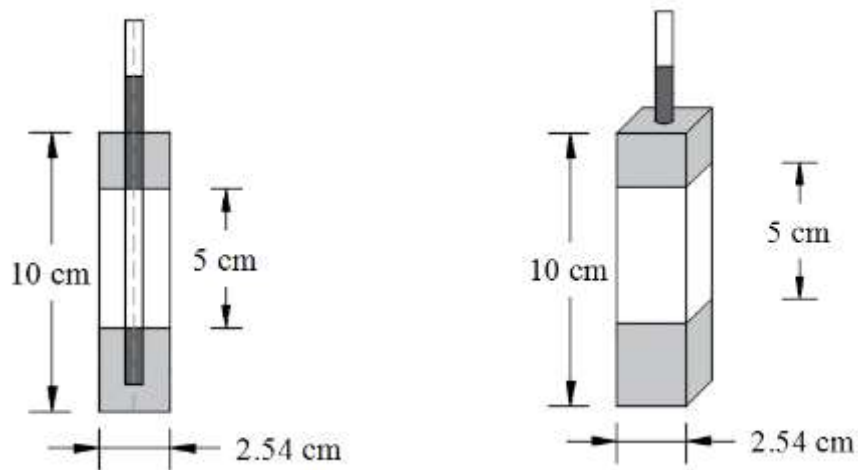


Figura 21. Esquema de probetas de mortero para medición de pruebas electroquímicas.

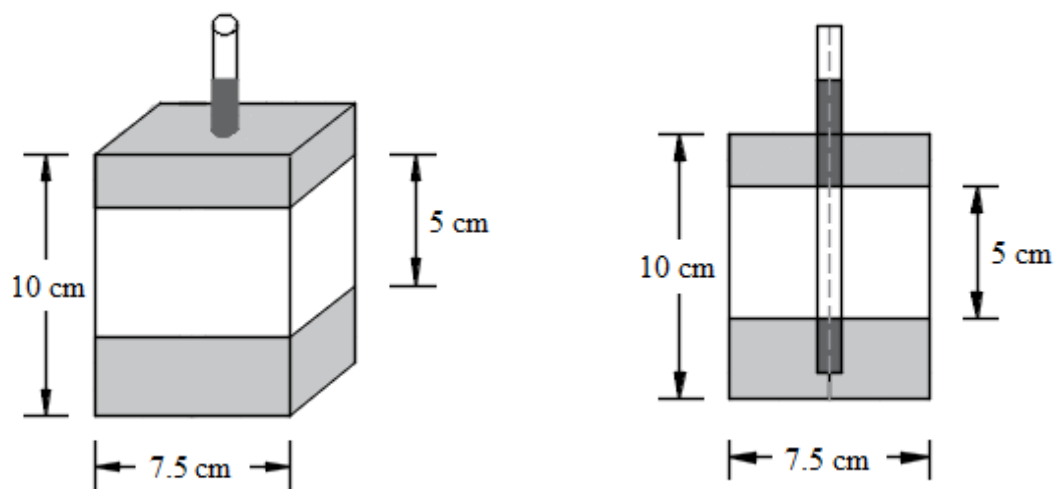


Figura 22. Esquema de probetas de concreto para medición de pruebas electroquímicas.

CAPITULO 5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales de partida, en la primera parte se da una explicación de las propiedades físicas y químicas mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X. Posteriormente se presentan los resultados de propiedades físico mecánicas de los sistemas elaborados. Y finalmente los resultados de las pruebas electroquímicas.

5.1. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DE PARTIDA

5.1.1. Microscopia electrónica de barrido (MEB).

La Figura 23 y Figura 24 , muestran las micrografías de los cementos utilizados. Tanto las partículas del cemento CPO 40 como del cemento Tipo V tienen una morfología angular, este tipo de morfología es característica de la fase C_3S (Alita) previamente reportada para los cementos portland [21].

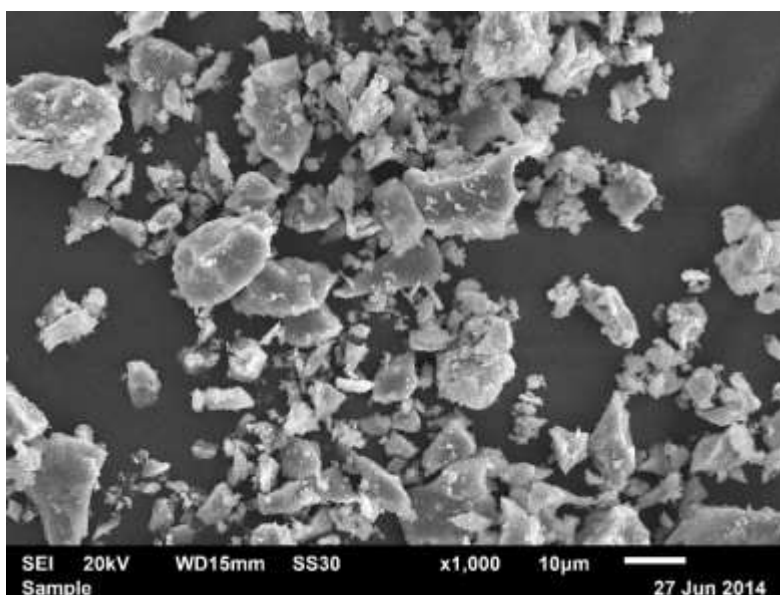


Figura 23. Micrografía de la morfología de las partículas de cemento CPO 40.

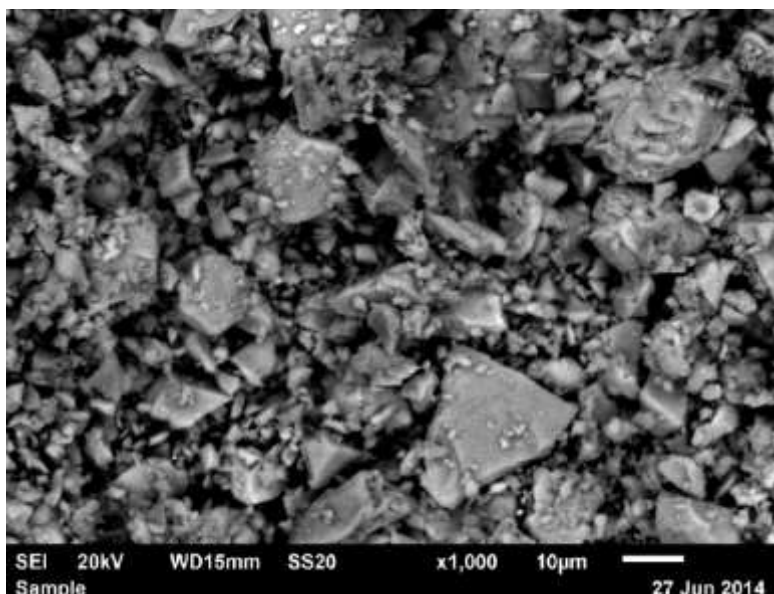


Figura 24. Micrografía de la morfología de las partículas de cemento tipo V.

En la Figura 25 se muestran dos micrografías de la CV obtenidas mediante MEB, del lado izquierdo, se observa la morfología de la ceniza volante, donde puede apreciarse que las partículas presentan la típica forma esférica reportada en la literatura [94]. Del lado derecho, se muestra una magnificación en la cual puede apreciarse a detalle la presencia de carbón sin quemar altamente poroso, como tal no presenta efecto alguno en el mecanismo de hidratación de la pasta, pero si una afectación en la trabajabilidad de la mezcla por el consumo de agua [95]. El análisis químico de estas partículas fue identificado mediante Espectroscopia por Dispersión de Energía (EDS) dentro del MEB y se muestra en la Figura 26.

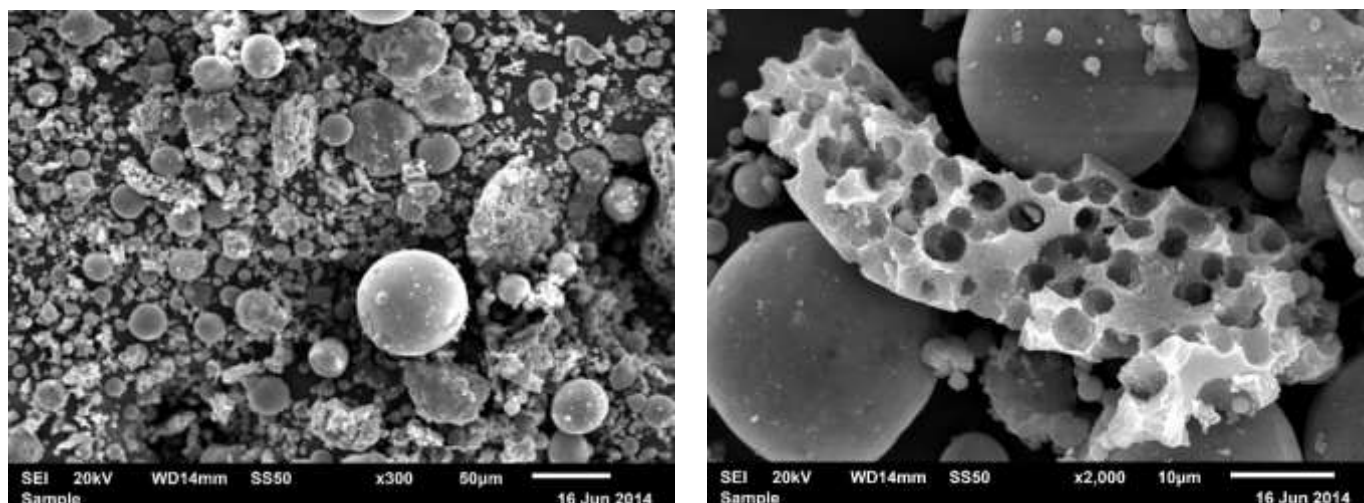


Figura 25. Micrografías de la morfología de las partículas de Ceniza Volante.

Elemento	% en peso	
	EDS 1	EDS 2
C	79.44	84.43
O	15.58	12.49
Al	1.91	0.65
Si	3.07	2.43

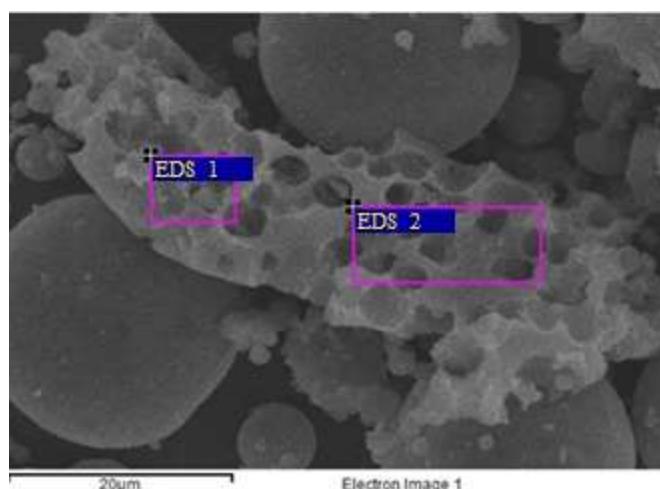


Figura 26. Identificación por EDS de una partícula de carbón sin quemar.

5.1.2. Difracción de rayos X (DRX).

Previo a la elaboración de las mezclas se hicieron análisis por DRX para conocer la composición mineralógica de los materiales en polvo utilizados en la investigación. En la Figura 27 y en la Figura 28 se presentan los difractogramas obtenidos de los cementos CPO 40 y Tipo V, respectivamente. Los resultados muestran las reflexiones características de las fases mineralógicas que constituyen a un cemento portland, silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), y ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), así como

la presencia de yeso en forma de anhidrita y hemihidrato. En los difractogramas presentados de ambos cementos no se aprecia una diferencia significativa en la intensidad de los picos en el contenido de C_3A , pero previamente en la descripción de la composición química (ver Tabla 3) puede observarse una diferencia en el contenido de Al_2O_3 de los cementos utilizados. Con la disminución en el contenido de óxido de aluminio ocurre una disminución del aluminato tricálcico, que es el producto principal que reacciona con una fuente de sulfato para dar lugar a la formación de etringita.

En el patrón de difracción de rayos-X de la Figura 29, el espectro de la CV indica que el material es parcialmente amorfo, debido a que se puede apreciar un halo que va desde los 17° a los 28° grados en la posición 2θ . Se observan también las reflexiones características de componentes cristalinos como cuarzo y mulita. Cabe mencionar, que la composición que presenta la CV se encuentra conformada por aluminosilicatos, que al combinarse con el cemento, durante su hidratación, consume hidróxido de calcio y da lugar a una mayor formación de C-S-H, lo cual puede repercutir en el aumento de la resistencia a compresión.

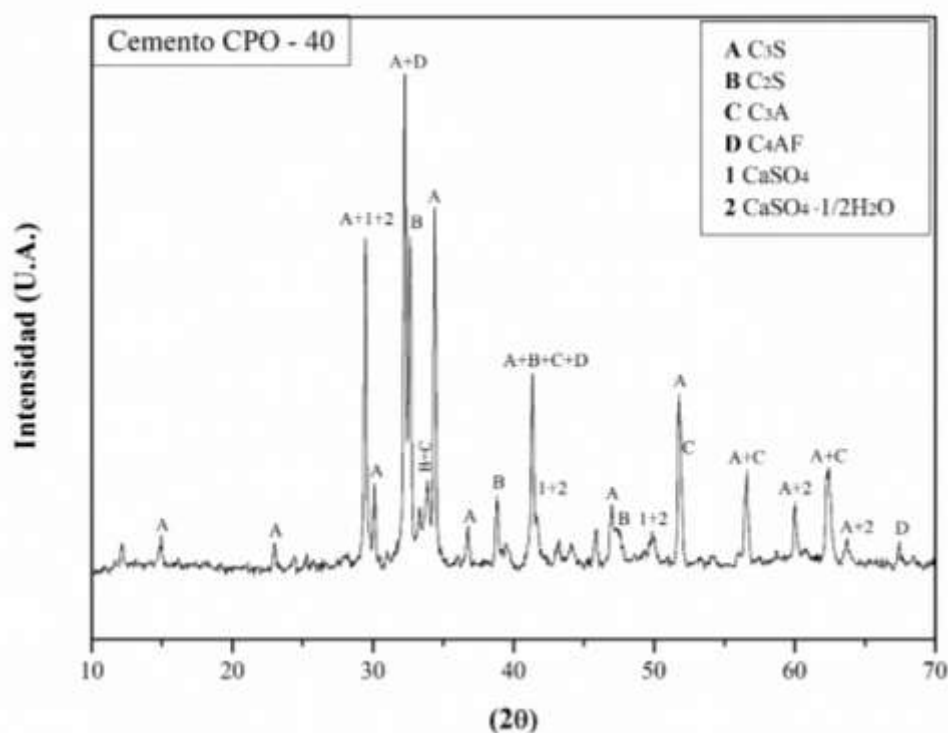


Figura 27. Patrón de difracción de rayos X del cemento CPO-40.

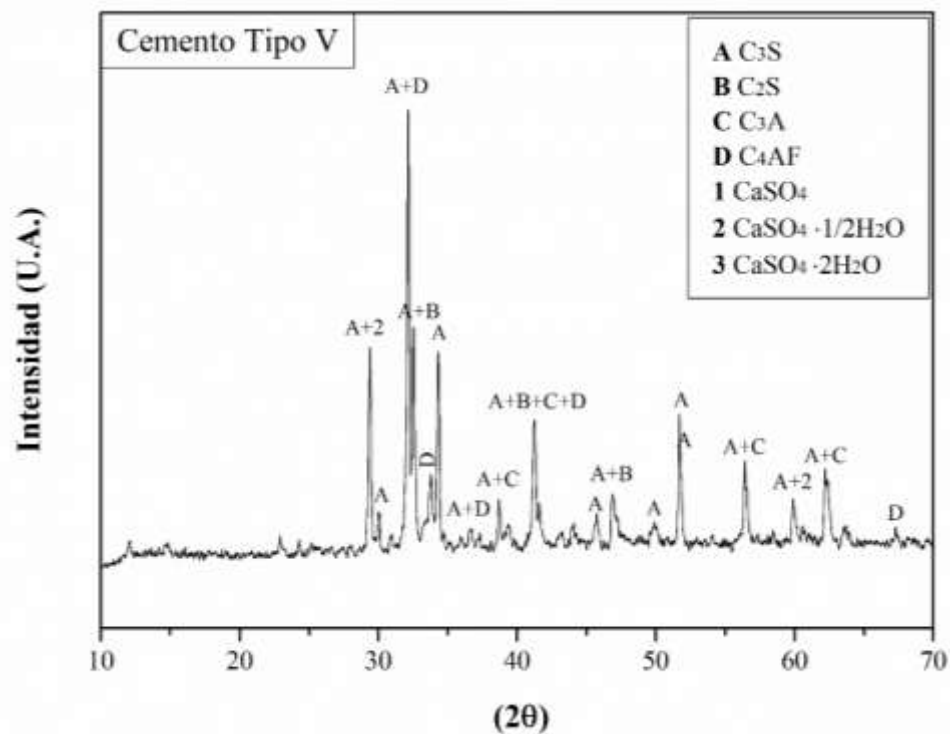


Figura 28. Patrón de difracción de rayos X del cemento Tipo V.

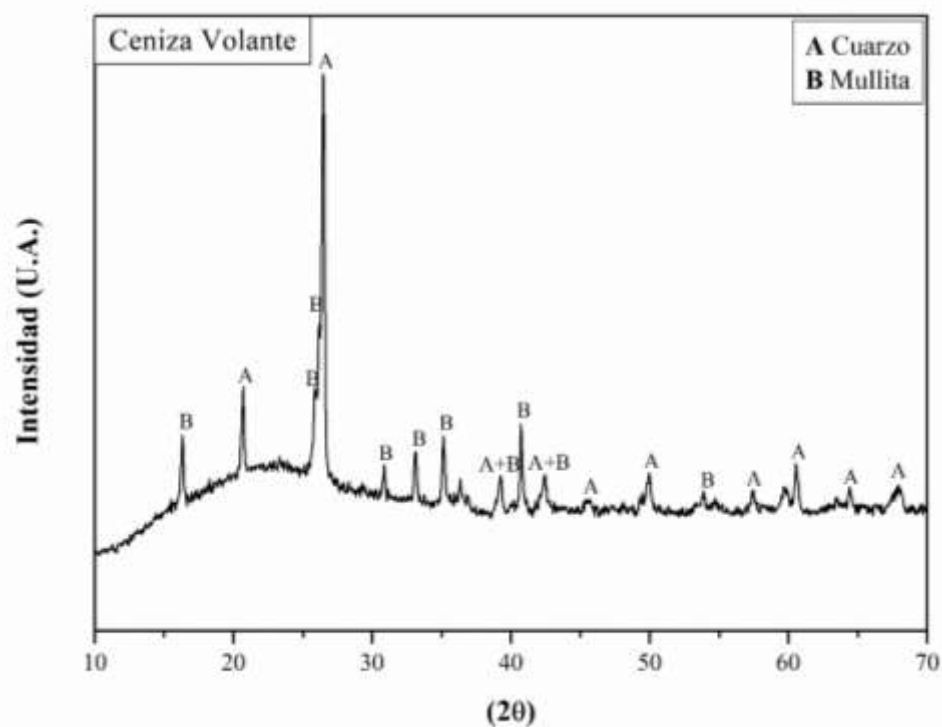


Figura 29. Patrón de difracción de rayos X de la Ceniza Volante (CV).

5.2. PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS

5.2.1. Propiedades en estado fresco

Las propiedades en estado fresco se obtuvieron inmediatamente después del mezclado, con la finalidad de observar la variación de cada una de las mezclas con el uso de ceniza volante y tecnología VERDiCT. La Tabla 13 y la Tabla 14 muestran las propiedades obtenidas de las mezclas de concreto (C) y mortero (M).

Tabla 13. Propiedades en estado fresco de mezclas de concreto (C).

Mezcla	Revenimiento (cm)	Contenido de aire (%)	Peso volumétrico (kg/m ³)
R-1	13.0	2.6	2400
CV-1	16.0	2.5	2381
V-1	15.0	2.4	2295
V-CV-1	18.0	2.5	2258
R-2	13.5	2.73	2399
CV-2	16.0	2.4	2346
V-2	15.3	2.4	2289
V-CV-2	18.7	2.5	2256

Tabla 14. Propiedades en estado fresco de mezclas de mortero (M).

Mezcla	Fluidez (%)	Contenido de aire (%)
R-1	55	2.4
CV-1	58	2.3
V-1	56	2.0
V-CV-1	60	2.1
R-2	54	2.4
CV-2	58	2.3
V-2	56	2.1
V-CV-2	61	2.2

En base a los resultados mostrados de las propiedades en estado fresco de las mezclas podemos observar que con el uso de ceniza volante (CV) se genera un aumento del revenimiento en las mezclas CV y CV -VERDiCT en comparación con las otras mezclas. Este comportamiento puede ser atribuido a la forma esférica de las partículas de CV, que además de funcionar como material de reemplazo en mezcla, proporciona mayor fluidez y mejora la trabajabilidad de las mismas. Este efecto se observa de igual forma tanto en las mezclas de concreto como en las mezclas de mortero.

En cuanto al contenido de aire, no se observa una diferencia importante con el uso de agregado ligero y ceniza volante, lo que puede atribuirse a la correcta distribución de los mismos en la matriz, ocupando espacios huecos.

El peso volumétrico principalmente se encuentra relacionado con los materiales utilizados y la proporción de los mismos, los resultados de peso volumétrico mostraron que las mezclas V y V-CV son las que presentan un menor peso volumétrico, esto debido al agregado ligero y la ceniza volante que son materiales con una densidad menor que los otros materiales empleados en la mezcla.

5.2.2. Propiedades en estado endurecido

5.2.2.1. Resistencias a compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se muestran en las Figura 30 a la Figura 33 de los especímenes de mortero y concreto elaborados de cemento CPO 40 y cemento tipo V a diferentes edades de exposición en soluciones de sulfato de magnesio MgSO_4 (5 %), cloruro de magnesio MgCl_2 (3.5 %) y una combinación de ambas soluciones MgSO_4 - MgCl_2 (5 % y 3.5 % respectivamente).

Las resistencias a compresión de un mortero o concreto es uno de los indicadores de la capacidad física y mecánica del material. Ya que con esto se obtiene información sobre la calidad de la mezcla y de esta forma saber si es adecuada para ser utilizada en la elaboración de elementos estructurales.

Con relación al comportamiento que presentaron los especímenes de las diferentes mezclas a través del tiempo, la Figura 30 muestra que las mezclas de referencia R-1a, R-1b, y R-1c presentaron mayor resistencia a la compresión a los 28 días de exposición en las diferentes soluciones, en comparación con las mezclas con ceniza volante y las mezclas con tecnología VERDiCT V y V-CV. Al incrementar el tiempo de exposición a los 90 días, se observa que su resistencia disminuye en un 12.78 % para la mezcla R-1a, 9.62 % para la mezcla R-1b y 18.05 % para la mezcla R-1c, en comparación con a la resistencia máxima obtenida a los 56 días de exposición. En el caso de las mezclas con remplazo de cemento por CV se observa que las resistencias a compresión a 28 días son menores que las mezclas de referencia, esto debido a la lenta reacción de la CV. A los 56 días ocurre un aumento de resistencia, dicho comportamiento se debe al aumento de productos de hidratación generados de la reacción de la CV con el hidróxido de calcio disponible. Posteriormente después de este tiempo su resistencia disminuye en un 16.79 % para la mezcla CV-1a, 12.79 % para la mezcla CV-1b y 19.05 % para la mezcla CV-1c, el cual es un comportamiento similar al que presentan las mezclas de referencia.

Las mezclas V-1a, V-1b, y V-1c presentan resistencias a compresión más bajas que las mezclas de referencia y CV, las resistencias más bajas fueron a los 28 días con valores de 26.09, 25.31 Y 26 MPa respectivamente. En edades posteriores a 90 días los valores de

resistencia a compresión presentan un aumento de 25.43, 23.4 y 30.65 % respectivamente con respecto a los 28 días. En el caso de las mezclas CV-V-1a, CV-V-1b, y CV-V-1c se observa un comportamiento similar con valores de resistencia a compresión a los 28 días de 22.48, 23.17 y 24.62 MPa respectivamente. En edades posteriores a los 90 días presentan un aumento de 24.64, 25.74 y 32.7 % respectivamente. Las mejoras de resistencia de estas mezclas en edades posteriores se atribuyen a que existe una mayor hidratación y una mayor densificación de la matriz debido a la acción del curado interno [96].

MEZCLAS MORTERO DE CEMENTO CPO 40

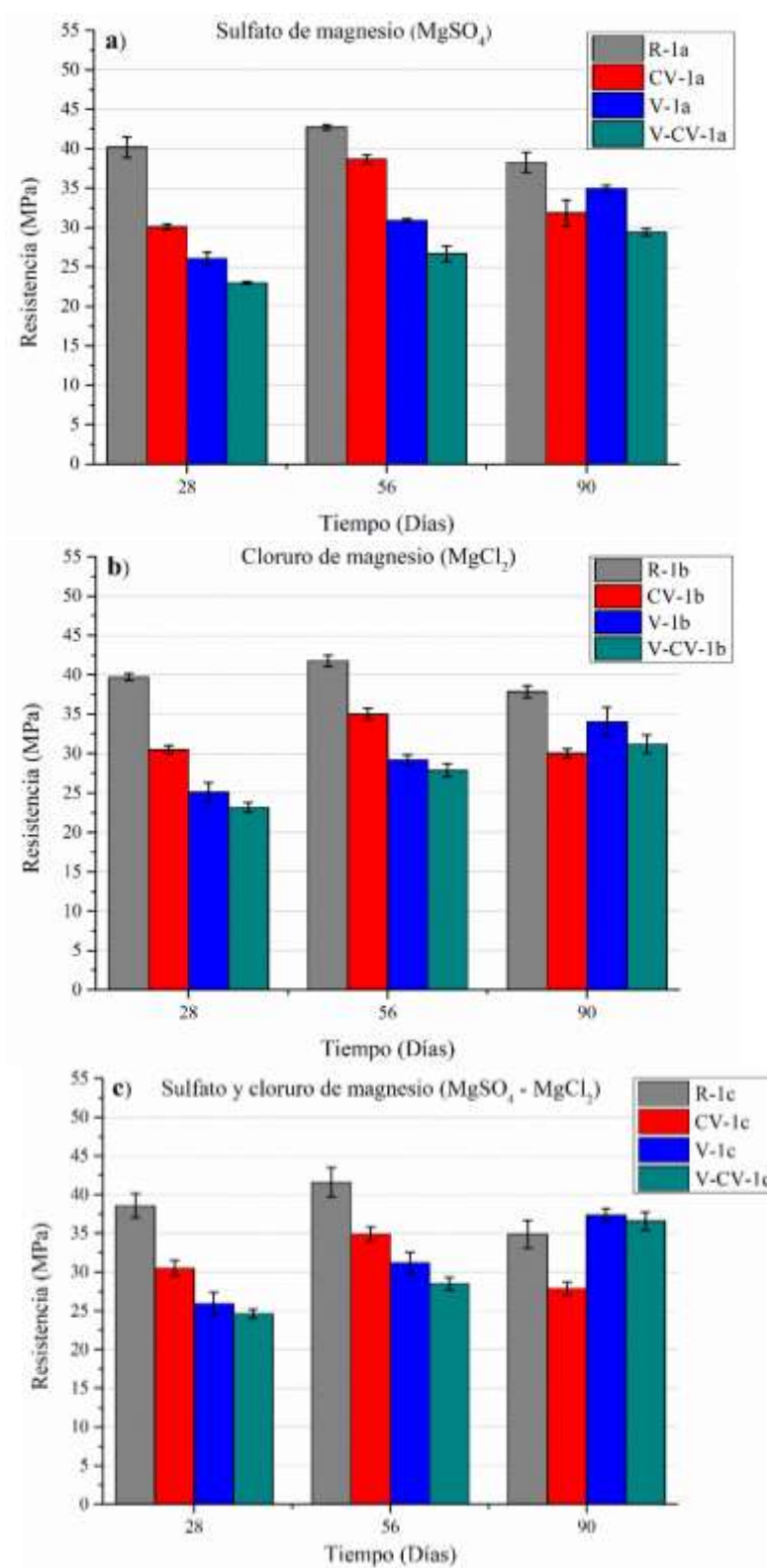


Figura 30. Resistencias a compresión (MPa) de morteros de cemento CPO 40 expuestas a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgCl_2$ y c) $MgSO_4 - MgCl_2$.

En la Figura 31 (**a**, **b** y **c**) muestran los resultados obtenidos de resistencias a compresión de mezclas de concreto de cemento portland. Estas mezclas presentan un comportamiento similar al de las mezclas de mortero elaboradas del mismo cemento, las mezclas que presentaron mayor resistencia a compresión en las diferentes soluciones de exposición a los 28 días son las mezclas de referencia R-1a, R-1b y R-1c. Al incrementar el tiempo de exposición a los 90 días se observa una pérdida de resistencia de un 10.56, 10 y 15.86 % respectivamente; dicha disminución se presenta con respecto a la máxima resistencia alcanzada a los 56 días.

En el caso de las mezclas con sustitución de un 20% de ceniza volante CV-1a, CV-1b y CV-1c en edades iniciales presentan resistencias bajas en comparación con las mezclas con 100% cemento portland, esto es debido a que requieren de hidróxido de calcio libre para que pueda llevarse a cabo su reacción y de esta forma generar un incremento de productos de hidratación favorables, para lograr un aumento de la resistencia a compresión. En edades posteriores a los 90 días de exposición, se observa un comportamiento similar al que presentan las mezclas de mortero elaboradas con mismo cemento, con disminuciones de resistencias de 6.12, 6.29 y 11.94 % con respecto a la máxima resistencia a compresión alcanzada a los 56 días. Se puede observar que los porcentajes de disminución de resistencias son menores que los que presentan las mezclas de mortero elaboradas del mismo cemento. El comportamiento que presentan estas mezclas en cuanto a pérdida de resistencia a compresión puede ser atribuido a una disminución en el contenido de la pasta en la mezcla.

En el caso de las resistencias a compresión de las mezclas con V y V-CV, independientemente de la solución a la cual son expuestas, presentan un buen comportamiento. De esta manera, las resistencias a la compresión de estas mezclas V-1a, V-1b y V1c en edades iniciales al igual que las mezclas de mortero son bajas a los 28 días de exposición, con valores de 28.87, 26.38 y 25.93 MPa respectivamente, posteriormente a los 90 días presentan un aumento de resistencia a compresión de 25.75, 33.83 y 35.79 % respectivamente. En el caso de las mezclas CV-V-1a, CV-V-1b, y CV-V-1c presentan un comportamiento similar a los 28 días, con valores de resistencia a compresión de 25.05, 24.10 y 23.13 MPa respectivamente. A los 90 días de exposición presentan un aumento de resistencia a la compresión con valores de 31.98, 33.43 y 38.45 % respectivamente.

MEZCLAS DE CONCRETO CEMENTO CPO 40

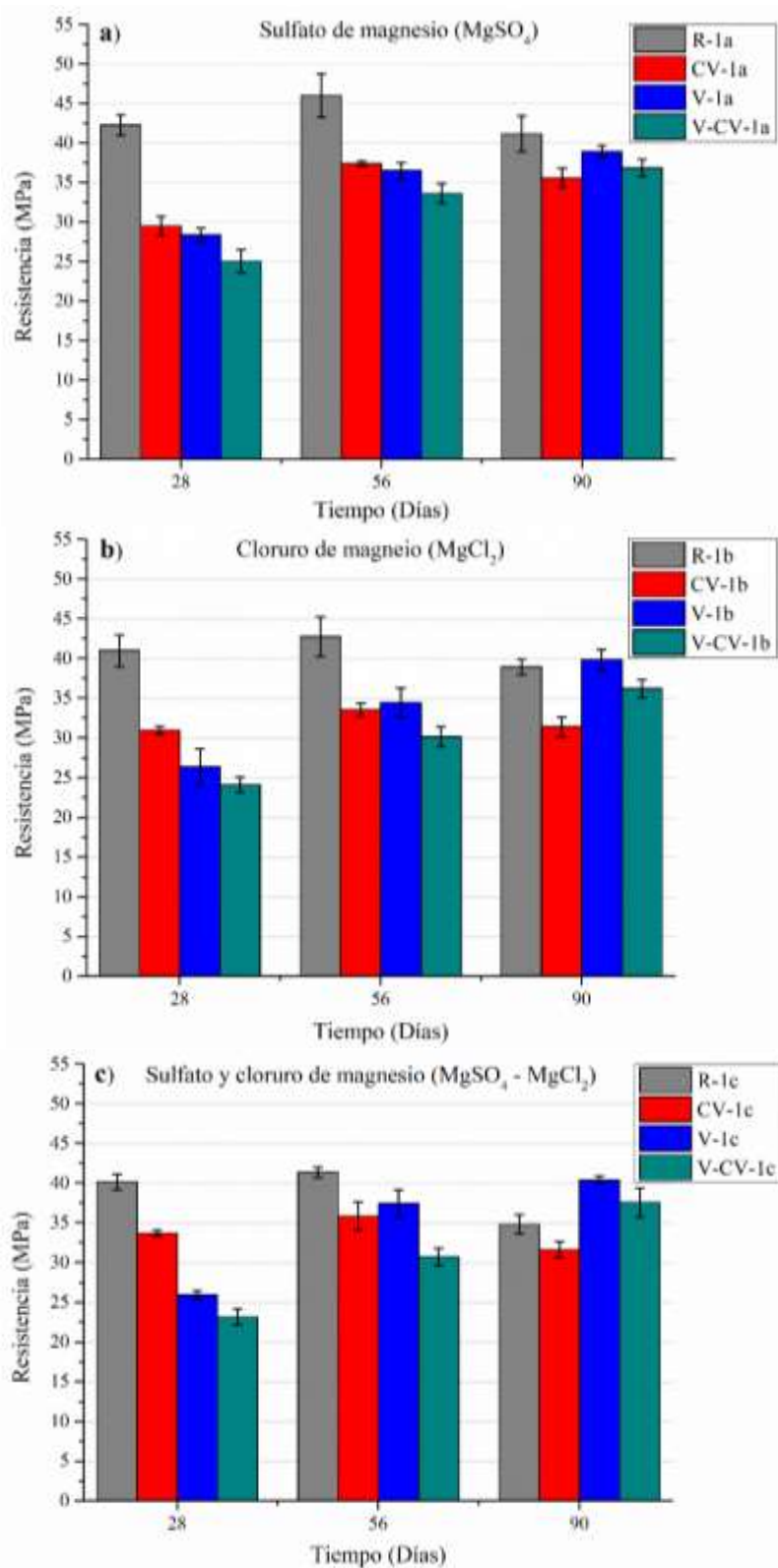


Figura 31. Resistencias a compresión de mezclas de concreto de cemento CPO 40 expuestas a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgCl_2$ y c) $MgSO_4 - MgCl_2$.

Las mezclas presentadas en la Figura 32, expuestas a diferentes soluciones, muestran un comportamiento similar al que presentan las mezclas elaboradas de cemento CPO. Se observa que las mezclas que presentan mayor resistencia a compresión a los 28 días de exposición son las mezclas de referencia R-2a, R-2b y R-2c. Sin embargo, al llegar a los 90 días de exposición las mezclas presentan una disminución en la resistencia compresión con valores de 9.41, 10.93, y 12.21 % respectivamente; estos porcentajes fueron obtenidos con respecto a los 56 días de exposición. El aumento de resistencia a compresión que presentan a los 56 días como es de esperarse, es un proceso normal que siguen las mezclas debido al aumento de productos de hidratación. Como puede observarse los valores de pérdida de resistencia que estas mezclas, son porcentajes más bajos que los que presentan las mezclas de mortero y concreto elaboradas de cemento portland (CPO). Esta disminución en los porcentajes de reducción en resistencia a la compresión puede atribuirse principalmente a que se hizo uso de un cemento resistente a sulfatos (TIPO V), con un bajo contenido de C_3A , por consecuencia existe una menor interacción entre la fuente de sulfato presente en la solución de exposición, por lo que existe la posibilidad de menor formación de etringita.

Las mezclas CV-2a, CV-2b y CV-2c, como es de esperarse, a edades tempranas presentan resistencias a compresión bajas debido a la lenta reacción de la CV. A los 90 días de exposición presentan una disminución de resistencia a compresión con valores de 5.38, 7.32 y 8.91 % respectivamente. Estos porcentajes de pérdida de resistencia se presentan con respecto a los 56 días de exposición, tiempo en el que aún ocurre a un aumento de resistencia debido al efecto puzolánico de la ceniza.

En cuanto al comportamiento que presentan las mezclas V-1a, V-1b y V-1c presentan un comportamiento similar al de las mezclas de mortero y concreto de CPO, a los 28 días se observaron resistencias a la compresión bajas, con valores de 27.02, 27.96 y 26.21 MPa respectivamente; pero a los 90 días presentan un aumento de resistencia a compresión de un 26.28, 24.80 y 29.73 % con respecto a los 28 días. En el caso de las mezclas V-CV-1a, V-CV-1b y V-CV-1c de igual forma presentan valores de resistencia a la compresión bajos de 25.72, 24.13 y 24.57 MPa respectivamente a los 28 días. Posteriormente, a los 90 días al igual que las mezclas con la tecnología VERDiCT, presentan un aumento en sus valores de resistencia a compresión de un 23.95, 34.71 y 33.37 % respectivamente. Estas dos mezclas

mencionadas anteriormente son las mezclas que presentan un comportamiento más favorable frente a los diferentes ambientes de exposición, similar al que presentaron las mezclas de mortero y de concreto elaboradas de cemento portland; ya que a los 28 días presentan resistencias bajas en comparación con las otras mezclas, pero con respecto al tiempo de exposición a los 90 días se observa un aumento de resistencias a compresión en ambas mezclas.

MEZCLAS DE MORTERO CEMENTO TIPO V

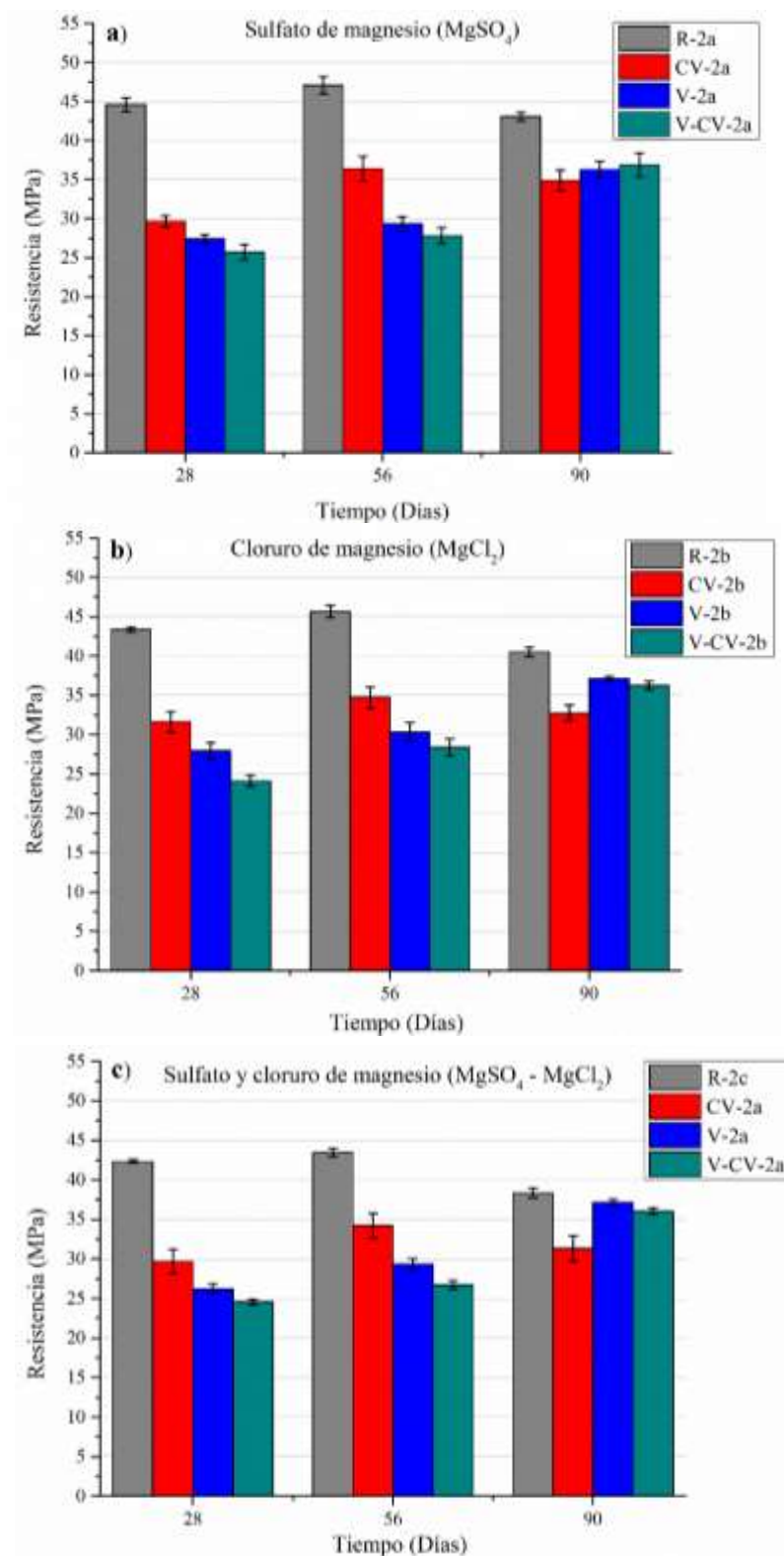


Figura 32. Resistencias a compresión de muestras de mortero de cemento Tipo V expuestas a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgCl_2$ y c) $MgSO_4 - MgCl_2$.

Los resultados presentados en la Figura 33 muestran las resistencias a compresión de mezclas de concreto elaboradas de cemento Tipo V, expuestas a diferentes soluciones. Se puede observar que las mezclas de referencia a los 28 días son las que presentan mayores resistencias a compresión, un comportamiento similar al que muestran las mezclas elaboradas de CPO y las mezclas de Mortero elaboradas de cemento tipo V. De esta manera, a los 90 días de exposición también presentan una disminución en las resistencias a compresión con valores de 7.29 % para la mezcla R-2a, 8.12 % para la mezcla R-2b, y 10.70 % para la mezcla R-2c, con respecto a los 56 días de cura, que fue en la cual alcanzaron su máximo valor de resistencia a la compresión.

En cuanto al comportamiento que presentan las mezclas CV-2a, CV-2b y -CV-2c es similar al que presentan las mezclas de referencia, a los 28 días presentan resistencias bajas en comparación con las mezclas de referencia, debido a la presencia de ceniza volante y a su lenta reacción, después de este tiempo al llegar a los 90 días de exposición se observó una pérdida de resistencia de 2.59, 6.31 y 7.77 % respectivamente, con respecto a la máxima resistencia a los 56 días. Dicho aumento se presenta de la evolución en el proceso de hidratación de la CV con hidróxido de calcio para formas más C-S-H.

Las mezclas V- y V-CV al igual que en las mezclas elaboradas de CPO son las mezclas que presentan un mejor comportamiento con respecto al tiempo, aunque en edades iniciales mostraron resistencia a compresión bajas en comparación con las mezclas de referencia y CV, en edades posteriores, aún estando en exposición, presentan una evolución de resistencia a compresión.

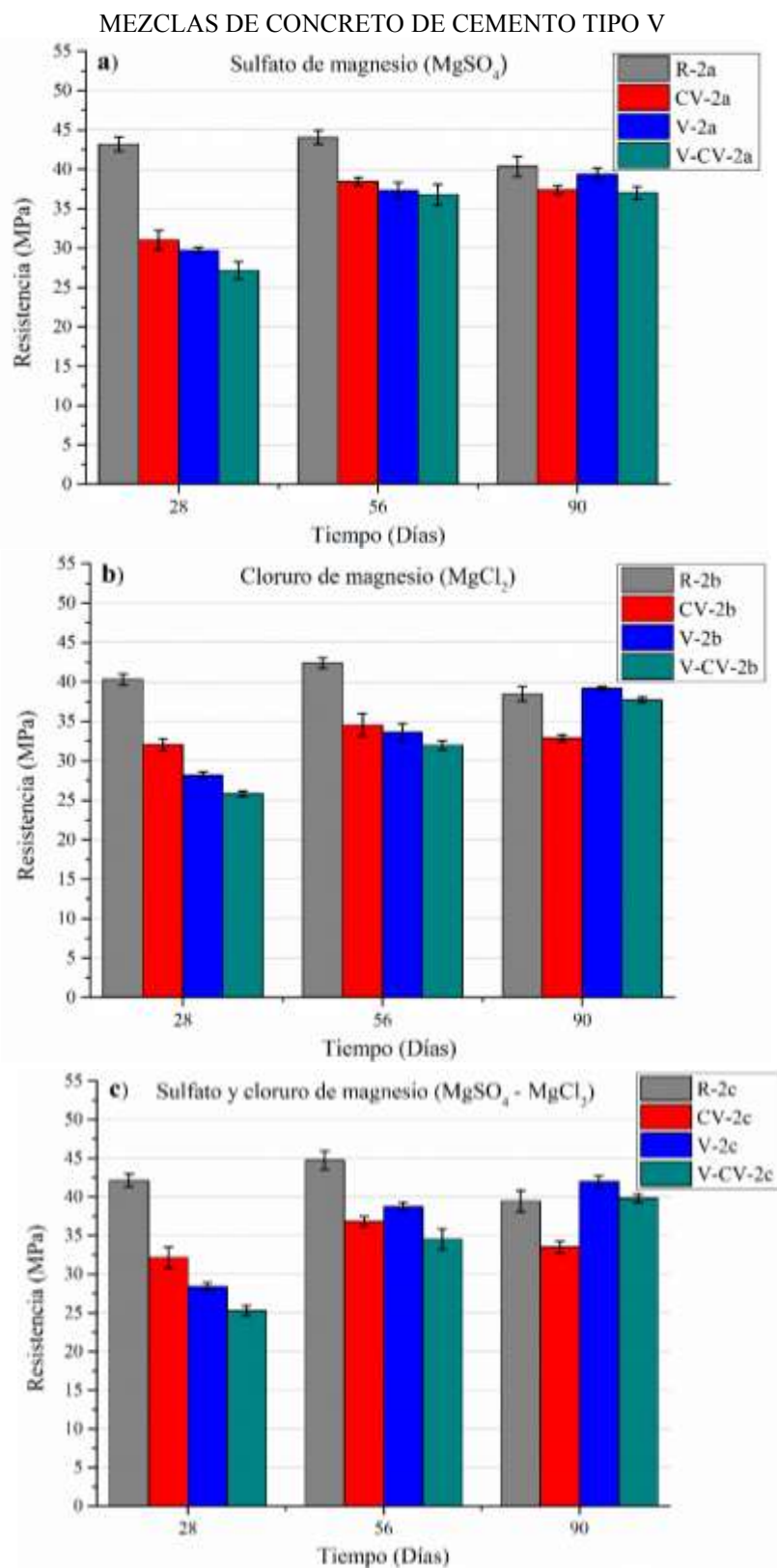


Figura 33. Resistencias a compresión de muestras de concreto de cemento Tipo V expuestas a solución de a) MgSO_4 , b) MgCl_2 y c) $\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$.

En la Tabla 5 se puede apreciar de forma más detallada la reducción de resistencias a compresión de las mezclas de referencia y mezclas con sustitución de 20 % CV elaboradas de cemento CPO 40 y cemento TIPO V expuestas a diferentes soluciones. Esta reducción de resistencias a compresión se presenta con respecto a la máxima resistencia alcanzada a los 56 días de exposición. En esta tabla se excluyen las mezclas con tecnología VERDiCT debido a que su resistencia a compresión en las diferentes edades siempre presentó un incremento.

Tabla 15. Reducción de resistencia a los 90 días de mezclas de Mortero y Concreto de cementos mezclados expuestos en soluciones de $MgSO_4$ (MS), $MgCl$ (MCl) y $MgSO_4 + MgCl$ (MS+MCl).

Tipo de cemento / mezcla	Reducción de resistencia (%)		
	MS	MCl	MS+MCl
M/CPO/R	12.78	9.62	18.05
M /V/R	9.41	10.93	12.21
M/CPO/CV (20%)	16.79	12.79	19.05
M /V/CV (20%)	5.38	7.32	8.91
C /CPO/R	10.56	10	16
C /V/R	7.29	8.12	10.70
C /CPO/CV (20%)	6.12	6.29	11.94
C /V/CV (20%)	2.59	6.31	7.8

Discusión de resultados de resistencia a compresión

Una explicación en la pérdida de resistencia de las mezclas de referencia y mezclas con sustitución de 20% CV expuestas a las diferentes soluciones puede ser atribuible principalmente al contenido de Mg^{++} , ya que en el mecanismo de degradación por parte del catión genera una descalcificación del C-S-H para formar M-S-H que es un gel menos cohesivo que el original [97]. La pérdida de resistencia a compresión que presentan las mezclas expuestas en solución de $MgSO_4$ es mayor en comparación a la presentada por las mezclas expuestas en solución de $MgCl_2$, este comportamiento es debido a la acción conjunta tanto del Mg^{++} como del sulfato. Por parte del magnesio se generan reacciones que dan lugar a la pérdida de resistencia de la pasta por la descalcificación del C-S-H, mientras que por parte del sulfato se presentan expansiones generadas por la formación de etringita tardía que da lugar a la formación de grietas. En el caso del comportamiento mostrado en las mezclas expuestas en solución de $MgCl_2$, el efecto de disminución de resistencia se puede atribuir solo a la acción del Mg^{++} , mientras que el Cl^- puede formar compuestos que como tal no representan un efecto en la pérdida de resistencia de la pasta (con composiciones tipo sal de Friedel), si no que su efecto se presenta con el acero de refuerzo. En cuanto a las mezclas expuestas a la solución combinada $MgSO_4 - MgCl_2$ las pérdidas de resistencias resultaron ser mayores en comparación con las mezclas en las otras soluciones, este comportamiento puede atribuirse tanto a la acción del sulfato que genera formación de etringita, como a la alta concentración de Mg^{++} proporcionada por ambas soluciones ya que éste último puede generar la pérdida de resistencias a compresión, y en conjunto pueden causar un daño gradual.

Los valores de pérdida de resistencias a compresión de las mezclas elaboradas de cemento TIPO V muestran valores inferiores a los que presentan las mezclas elaboradas de cemento portland, comportamiento que pudiera atribuirse al tipo de cemento ya que es un cemento resistente a sulfatos, en el cual se tiene un menor contenido de C_3A , por lo que la formación de etringita que pudiera generarse es menor.

Las bajas resistencias a compresión de las mezclas con tecnología VERDiCT en edades iniciales se atribuyen tanto al aditivo modificador de viscosidad, como a la naturaleza porosa del agregado ligero, debido a los pequeños huecos que quedan vacíos después de la absorción del agua inducida por el agregado [98].

En cuanto a la disminución de las resistencias a compresión de las mezclas V-CV-1a, -V-CV-1b, y V-CV-1c, muestran un comportamiento similar a las mezclas V tanto a los 28 días como a edades posteriores, aunque con resistencias inferiores, comportamiento que se atribuye a la lenta reacción de la CV y a la presencia del agregado ligero [99]. Que como se sabe con el paso del tiempo se presenta una densificación de la matriz cementante, tanto por la evolución de la reacción de la ceniza volante como por la acción del curado interno.

En general, se puede observar que aunque las resistencias a compresión que muestran las mezclas con tecnología VERDiCT son menores en edades iniciales en comparación con las resistencias que presentan las otras mezclas, con el tiempo muestran un aumento de la misma aún permaneciendo en ambientes de exposición severos. Dicho efecto pudiera indicar que esta tecnología resulta benéfica, ya que provee un aumento de resistencia debido a la densificación de la microestructura de la pasta proporcionada por el curado interno. De la misma manera, presenta un efecto barrera debido a la modificación de la viscosidad de la solución de los poros, ya que por medio de la red de poros ocurre el transporte difusivo de especies iónicas. Otro aspecto importante a resaltar en el comportamiento de las mezclas con tecnología VERDiCT es que independiente del tipo de cemento utilizado, a pesar de estar en exposición, presentan un comportamiento benéfico.

5.2.2.2. *Cambios de longitud.*

La prueba para determinar los cambios de longitud, para evaluar la resistencia al ataque químico por sulfatos se realizó de acuerdo al procedimiento indicado en la norma ASTM C-1012 “Standard Test Method for Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a sulfate Solución”. Como criterios de rendimiento se tomó el valores de 0.05%, que es un valor utilizado por otros autores [61].

De la Figura 34 a la

Figura 37, se presentan los resultados de mediciones de cambios de longitud, obtenidos para cada tipo de cemento (CPO 40) y cemento (TIPO V) en mezclas de mortero y concreto, donde se realizaron mediciones de 1 a 20 semanas.

La Figura 34 presenta la evolución en el cambio de longitud de diferentes mezclas, medido en barras prismáticas descritas en el capítulo 4 del presente documento. En la Figura 34 (a) y (b) se puede observar que, a las 20 semanas de exposición, las mezclas que presentaron un mayor porcentaje de expansión fueron las mezclas de referencia R-1a y R-1c con valores de 0.087 y 0.19 % respectivamente, en comparación con las mezclas con CV y las mezclas con la tecnología VERDiCT. En el caso de las mezclas CV-1a y CV-1c presentaron porcentajes de expansión menores con valores de 0.041 y 0.088 % respectivamente, con respecto a los valores mostrados en las mezclas de referencia

Mientras que las mezclas con la tecnología V-1a, V-1c, V-CV-1a y V-CV-1c, en comparación con las otras mezclas, son las mezclas que presentan un mejor comportamiento a las 20 semanas de exposición, con valores de 0.033, 0.023, 0.030 y 0.031 % respectivamente. Estas mezclas al igual que los resultados mostrados en los ensayos de resistencia a compresión, tanto en mezclas de mortero como de concreto elaboradas de cemento portland, presentaron un comportamiento favorable frente a los diferentes ambientes de exposición.

MORTERO DE CEMENTO CPO 40

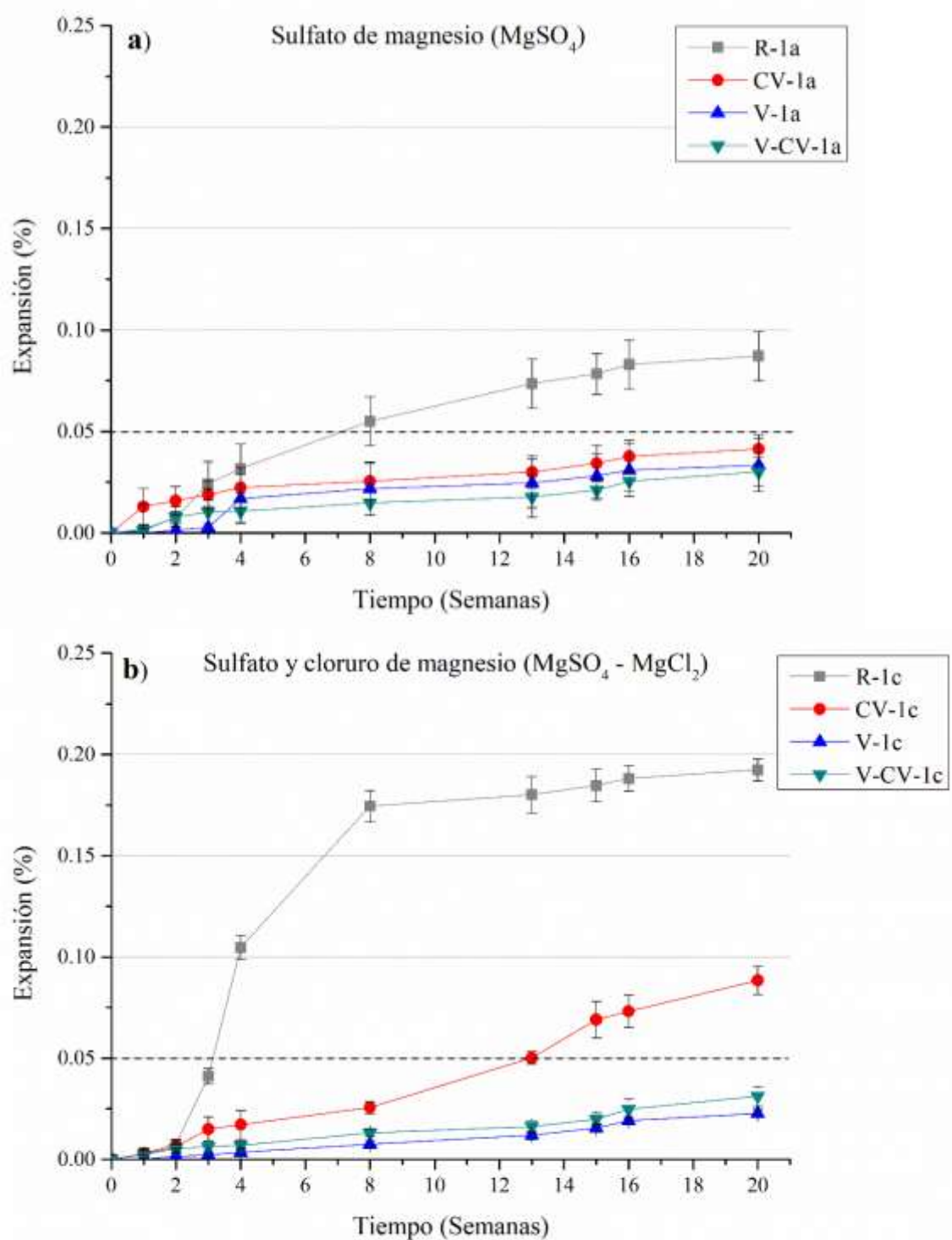


Figura 34. Expansión de muestras de mortero de cemento CPO 40 expuestas a solución de a) $MgSO_4$, b) $MgSO_4 - MgCl_2$.

La Figura 35 muestra los resultados de cambio de longitud de las mezclas de concreto elaboradas de cemento CPO 40, expuestas a solución de MgSO_4 y $\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$, donde se puede observar que las mezclas con mayor porcentaje de expansión son las mezclas de referencia R-1a y R-1c con valores de 0.050 y 0.164 % respectivamente, comportamiento similar al que presentan las mezclas de mortero elaboradas del mismo cemento. En el caso de la mezcla de referencia de la Figura 35 (a) se observa que presenta porcentaje de expansión menor en comparación con la mezcla de mortero elaborada del mismo cemento, esto pudiera ser atribuible a una disminución de la cantidad de pasta de la mezcla. Observando el comportamiento que presentan las mezclas de referencia R-1a y R-1c en las diferentes soluciones, la mezcla R-1c de la Figura 35 (b), es la que presentó un mayor porcentaje de expansión, pudiendo atribuir este comportamiento a la alta concentración de Mg^{++} de la solución, debido a que da lugar a la pérdida de resistencia por la desclasificación del C-S-H. Y en segunda instancia, permitiendo una mayor afectación por la posible formación de productos expansivos generados por la acción de los sulfatos, generando tensiones internas.

Por otro lado, el comportamiento que presentaron las mezclas CV-1a y CV-1c mostraron porcentajes de expansión menores, con valores de 0.031 y 0.046 % respectivamente, al compararlos con los mostrados en las mezclas de referencia.

El comportamiento que se observaron de las mezclas V-1a, V-1c, CV-V1a y CV-V-1c de las Figura 35 (a) y (b) es similar al que presentaron las mezclas de mortero elaboradas de CPO, que son las mezclas con un mejor desempeño con valores de expansión de 0.022, 0.025, 0.020 y 0.026 % respectivamente, con valores de expansión inferiores a los mostrados en las mezclas de referencia y las mezclas con CV.

CONCRETO DE CEMENTO CPO 40

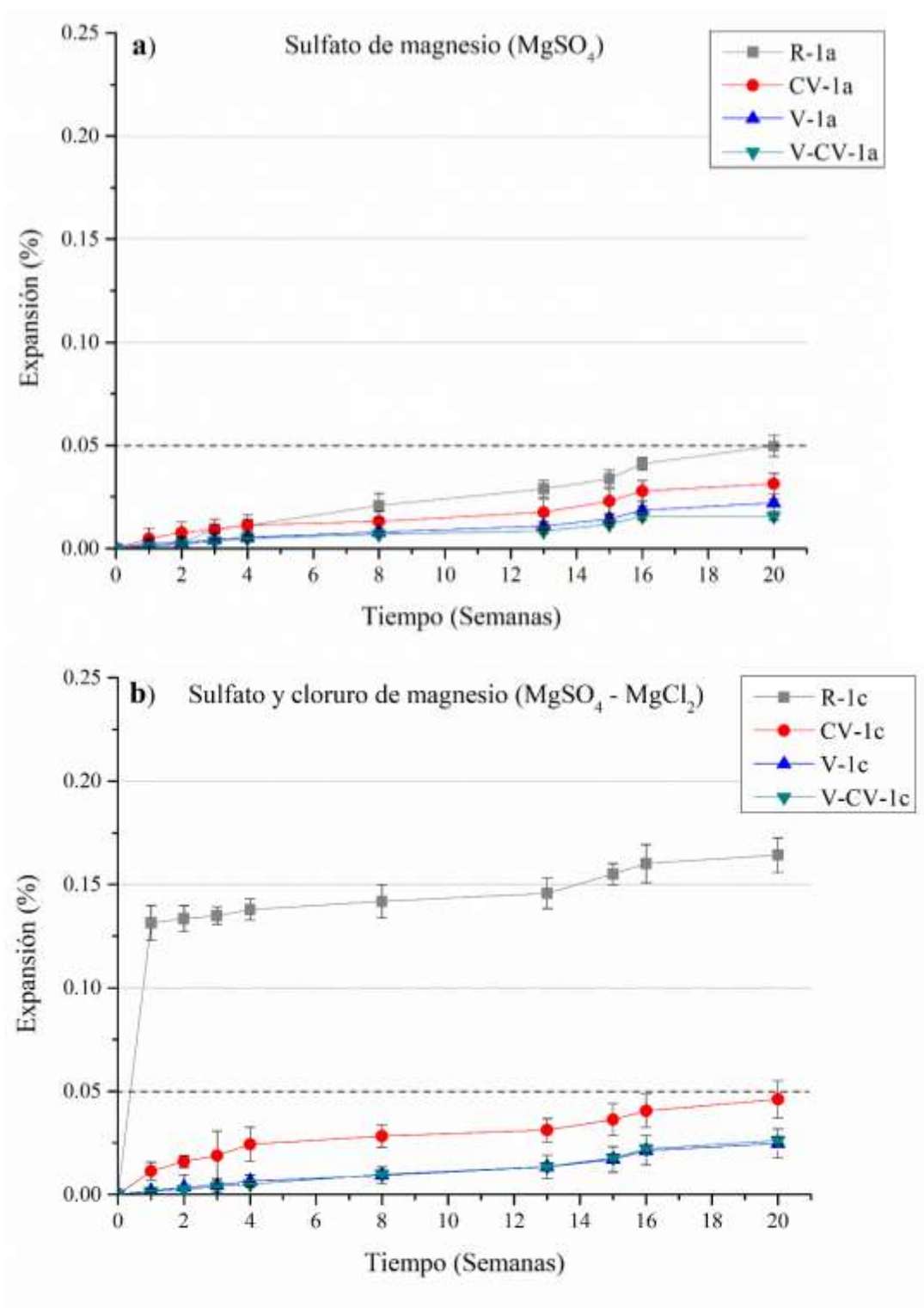


Figura 35. Expansión de muestras de Concreto de cemento CPO 40 expuestas a solución de a) MgSO_4 y b) $\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$.

En la Figura 36 se muestran resultados de cambios de longitud obtenidos de mezclas de mortero de cemento TIPO V, expuestas a soluciones de MgSO_4 y una combinación de $\text{MgSO}_4 + \text{MgCl}_2$. Los resultados muestran que al igual que las mezclas de mortero como de concreto elaboradas de CPO, las mezclas de referencia R-2a y R-2c son las mezclas que presentaron un mayor porcentaje de expansión a las 20 semanas de exposición, con valores de 0.049 y 0.071 % respectivamente. Mientras que las mezclas con ceniza volante CV-2a y CV-2c presentaron porcentajes menores con valores de 0.034 y 0.036 % respectivamente, con relación a los valores mostrados en las mezclas de referencia.

El comportamiento observado en las mezclas V-1a, V-1c, CV-V1a y CV-V-1c de las Figura 36 (a) y (b) es similar al de las mezclas de mortero y concreto elaboradas de CPO, son las mezclas con un mejor desempeño a las 20 semanas de exposición, con valores de expansión de 0.023, 0.035, 0.033 y 0.035 % respectivamente, que son valores de expansión inferiores a los mostrados en las mezclas de referencia y las mezclas con CV en ambas soluciones.

MORTERO DE CEMENTO TIPO V

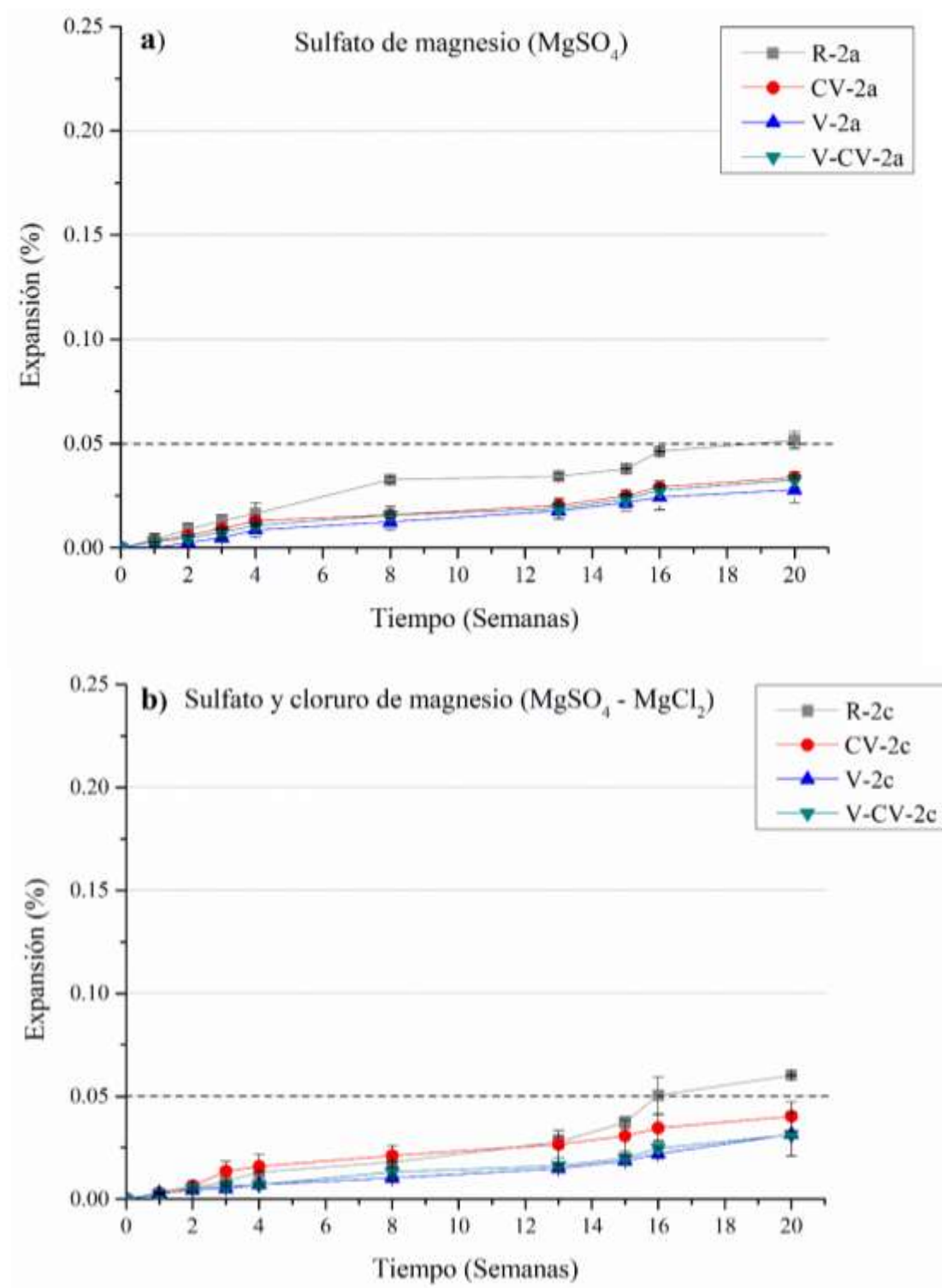


Figura 36. Expansiones de muestras de mortero de cemento tipo V expuestas a solución de a) $MgSO_4$, y b) $MgSO_4 - MgCl_2$.

En la Figura 37 se muestran los registros de las mediciones de cambios de longitud de mezclas de concreto elaboradas de cemento tipo V, expuestas a solución de MgSO_4 y una combinación de soluciones de $\text{MgSO}_4 + \text{MgCl}_2$. En la

Figura 37 (a) y (b) los resultados muestran que las mezclas que presentaron mayor porcentaje de expansión son las mezclas de referencia R-2a y R-2c con valores de 0.049 y 0.068 % respectivamente. Mientras que las mezclas con ceniza volante CV-2a y CV-2c mostraron un comportamiento similar, pero con porcentajes menores con valores de 0.041 y 0.035 % respectivamente, con relación a los valores obtenidos en las mezclas de referencia.

En cuanto al comportamiento que presentan las mezclas V-1a, V-1c, CV-V1a y CV-V-1c de la

Figura 37 (a) y (b), es similar al comportamiento que presentan las mezclas de mortero y concreto elaboradas de CPO. Con el tiempo de exposición hasta las 20 semanas son las mezclas que presentan un mejor desempeño, con valores de expansión de 0.027, 0.022, 0.024 y 0.023 % respectivamente, independientemente de la solución a la cual fueron expuestas, se mantienen por debajo del límite máximo expansión de 0.050 %.

CONCRETO DE CEMENTO TIPO V

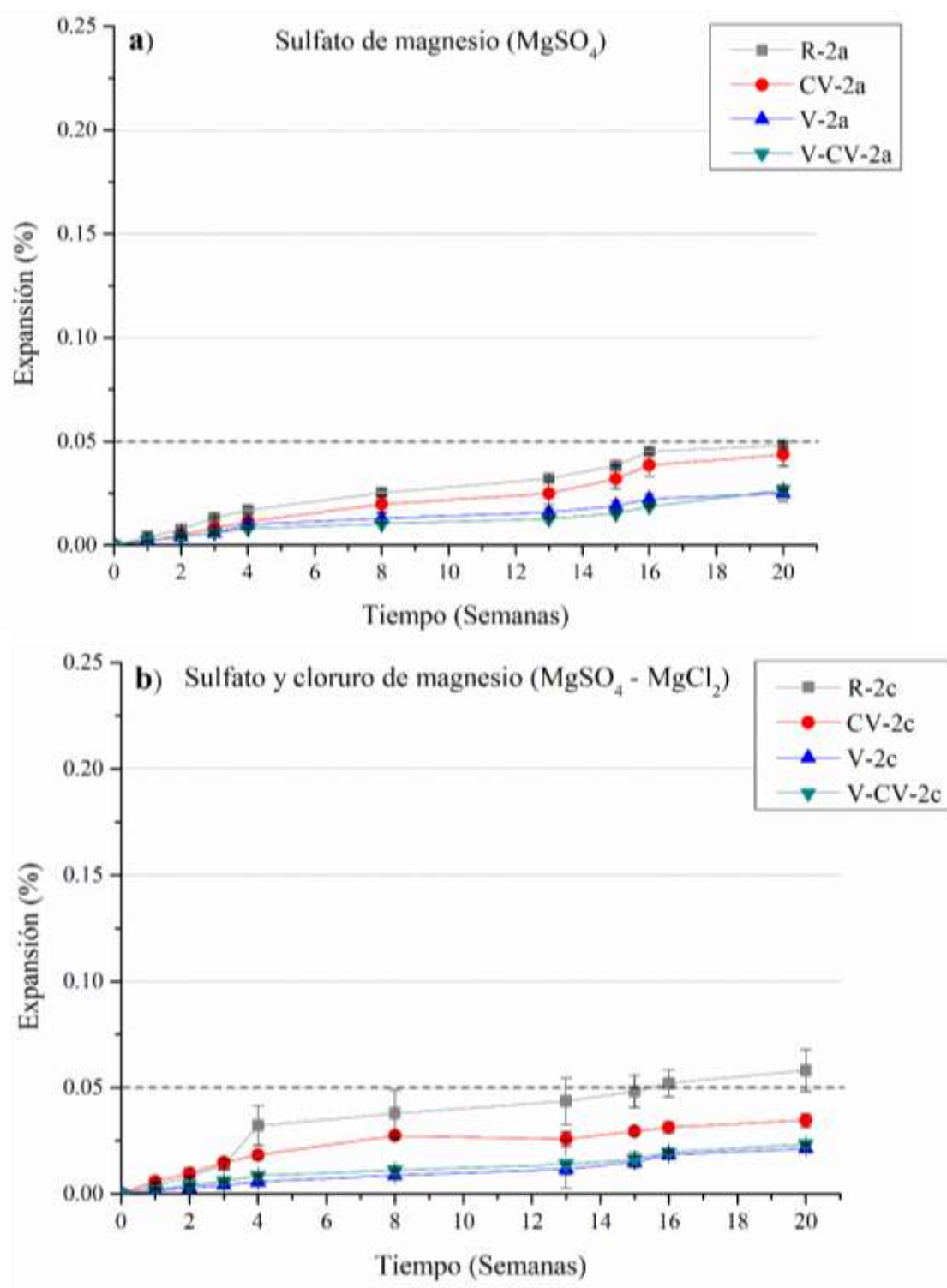


Figura 37. Expansiones de muestras de concreto de cemento Tipo V expuestas a solución de a) MgSO_4 , y b) $\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$.

Discusión de resultados de cambios de longitud

Los resultados de cambios de longitud mostrados en las mezclas de referencia expuestas en solución de MgSO_4 , tanto de mortero como de concreto, elaboradas de cemento CPO 40, mostraron un mayor porcentaje de expansión, comportamiento que se puede atribuir principalmente a la interacción del sulfato con el C_3A del cemento dando lugar a la formación de etringita [41]. En cuanto a las mezclas de referencia expuestas en la solución combinada ($\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$), son las que presentaron un mayor porcentaje de expansión en comparación con los resultados mostrados por las mezclas en solución de (MgSO_4), esto puede atribuirse a que es una solución que posee un alto contenido de magnesio y dado que este producto genera pérdidas de resistencia debido a la descalcificación del C-S-H, con mayor facilidad se pudieran estar presentando tensiones internas (expansiones) del sistema, debido a la formación de etringita generada por la acción de los sulfatos presente en la solución.

En el caso de las mezclas con ceniza volante la menor expansión que presentan en comparación con las mezclas de referencia, se puede atribuir a una reducción en el contenido de C_3A por la sustitución de una parte de cemento por CV. Por otra parte puede atribuirse al hidróxido de calcio, debido a que al agregarse materiales puzolánicos al cemento, reaccionan con el mismo para formar C-S-H secundario que es más denso que el primero [100].

Un comportamiento que se puede observar tanto en los resultados de resistencia a compresión, como en el cambio de longitud es, que al pasar de mezclas de mortero a mezclas de concreto se presenta una disminución en el mecanismo de deterioro, comportamiento que pudiera atribuirse a la disminución de la pasta de la mezcla, ya que al ser reducida se generan una menor interacción de las especies iónicas con los productos de hidratación del cemento, por lo tanto el daño disminuye por la menor formación de productos expansivos.

En los resultados de la expansión lineal, se puede observar que con el uso de cemento tipo V se presenta una reducción en el porcentaje de cambio de longitud, en comparación con los resultados mostrados en las mezclas de CPO 40 de mortero como de concreto. Esto pudiera atribuirse a que el cemento TIPO V es un cemento resistente a sulfatos el cual posee un porcentaje de C_3A menor en comparación con el cemento portland, de tal forma que la

posible formación de etringita sería menor, esto a consecuencia de una menor interacción de los sulfatos presentes en las soluciones de exposición con este producto de.

El comportamiento que presentaron las mezclas con tecnología VERDiCT y VERDiCT con ceniza volante fue favorable, al igual que en resultados de resistencia a compresión. Estas mezclas son las que presentaron un mejor desempeño, tanto en resistencia a compresión como en cambios de longitud, lo cual indica que VERDiCT favorece la resistencia al ataque químico, debido al aumento de la viscosidad de la solución de los poros, ya que existe una disminución del transporte difusivo de las especies iónicas en las diferentes soluciones de exposición, además de la densificación de la matriz cementante debido a la mayor hidratación que aporta el curado interno.

Otro aspecto importante a observar en las mezclas con tecnología V y V-CV es, que no existe una diferencia significativa en el desempeño de estas mezclas, al sustituir un 20% de cemento por ceniza volante, ya que independiente de la solución a la cual fueron expuestas su comportamiento es muy similar.

5.2.3. Mediciones Electroquímicas

Las mediciones electroquímicas, fueron realizadas en el laboratorio en un ambiente controlado, en especímenes prismáticos descritos previamente en el capítulo 4 del presente documento, tales especímenes fueron expuestos en solución de cloruro de magnesio (MgCl_2 al 3.5%) y una solución combinada de (MgSO_4 al 5% - MgCl_2 al 3.5%). En las Figuras 38 y 39, se muestran los resultados obtenidos del comportamiento presentado de las barras de acero embebidas en mezclas con diferentes características.

5.2.3.1. Potenciales de corrosión (E_{corr}).

Los potenciales de corrosión presentados, fueron medidos con referencia al electrodo de calomel saturado (ECS). En las figuras se especifica el rango de zona incierta que se encuentra entre los -120 a -270 mV, donde podría presentarse la actividad de corrosión del acero de refuerzo. El monitoreo de las pruebas electroquímicas se llevó a cabo después de 10 días de curado y posteriormente durante su exposición en solución, marcando como 0 el inicio de la exposición.

Las figuras presentan como los potenciales de corrosión en todas las mezclas inicialmente mostraron un estado pasivo de las barras de acero de refuerzo, lo cual resulta lógico ya que aún no existe difusión de las especies iónicas presentes en la solución, que son las responsables de cambiar el estado inicial de las barras. En las siguientes figuras se muestran las mediciones de potenciales de corrosión con respecto al tiempo hasta los 112 días, que como ya se sabe el potencial de corrosión es solo un indicativo de la probabilidad de que el evento de la corrosión se presente o no.

La Figura 38 muestra los resultados de potenciales de corrosión de mezclas de mortero de cemento (CPO 40 y cemento TIPO V), medidos durante 112 días de exposición. En la Figura 38 (a) y (b) se observa que en todas las mezclas expuestas en solución de MgCl_2 , inicialmente los potenciales de corrosión permanecieron dentro de una zona incierta, y más negativos en edades posteriores, con valores de potencial que indican una probabilidad de corrosión del 90%. En dicha solución las mezclas R-1b, CV-1b, R-2b y CV-2b, a partir de los 98 días presentaron potenciales que indican una probable actividad de corrosión, ya que sobrepasan el límite marcado de -270 mV, mientras que las mezclas V-1b, V-CV-1b, V-2b y V-CV-2b se encontraron en una zona incierta hasta los 112 días de exposición.

Los potenciales de corrosión de las barras de refuerzo en las mezclas R-1c, CV-1c, R-2c y CV-2c expuestas a solución de $\text{MgSO}_4 + \text{MgCl}_2$ que se presentan en la Figura 38 (c) y (d), al igual que las mezclas expuestas a solución de cloruro de magnesio, inicialmente presentaron potenciales menos negativos con valores de -221, -204, -188 y -205 mV respectivamente. Estos valores se encuentran dentro de una zona incierta, pero a edades posteriores a los 112 días estas mezclas mostraron potenciales más negativos con valores de -305, -314, -307 y -314 mV, por debajo de los -270 mV, lo cual indica que la probabilidad de corrosión es del 90%.

En cuanto al comportamiento que presentaron entre sí las barras de refuerzo de las mezclas V y, V-CV elaboradas de ambos cementos, expuestas en las diferentes soluciones, se mantienen dentro de una zona incierta tanto en edades iniciales como en edades posteriores, al menos hasta los 112 días de exposición, en un rango de -120 y -270 mV, aunque como se ha mencionado previamente, el potencial representa solo una probabilidad de que se presente una actividad de corrosión.

Como se puede observar en la Figura 38 (a) y (c) de cemento CPO 40 presentaron una mayor probabilidad de corrosión en comparación con el comportamiento que se observó las mezclas de cemento TIPO V.

MORTERO DE CEMENTO CPO 40 Y CEMENTO TIPO V

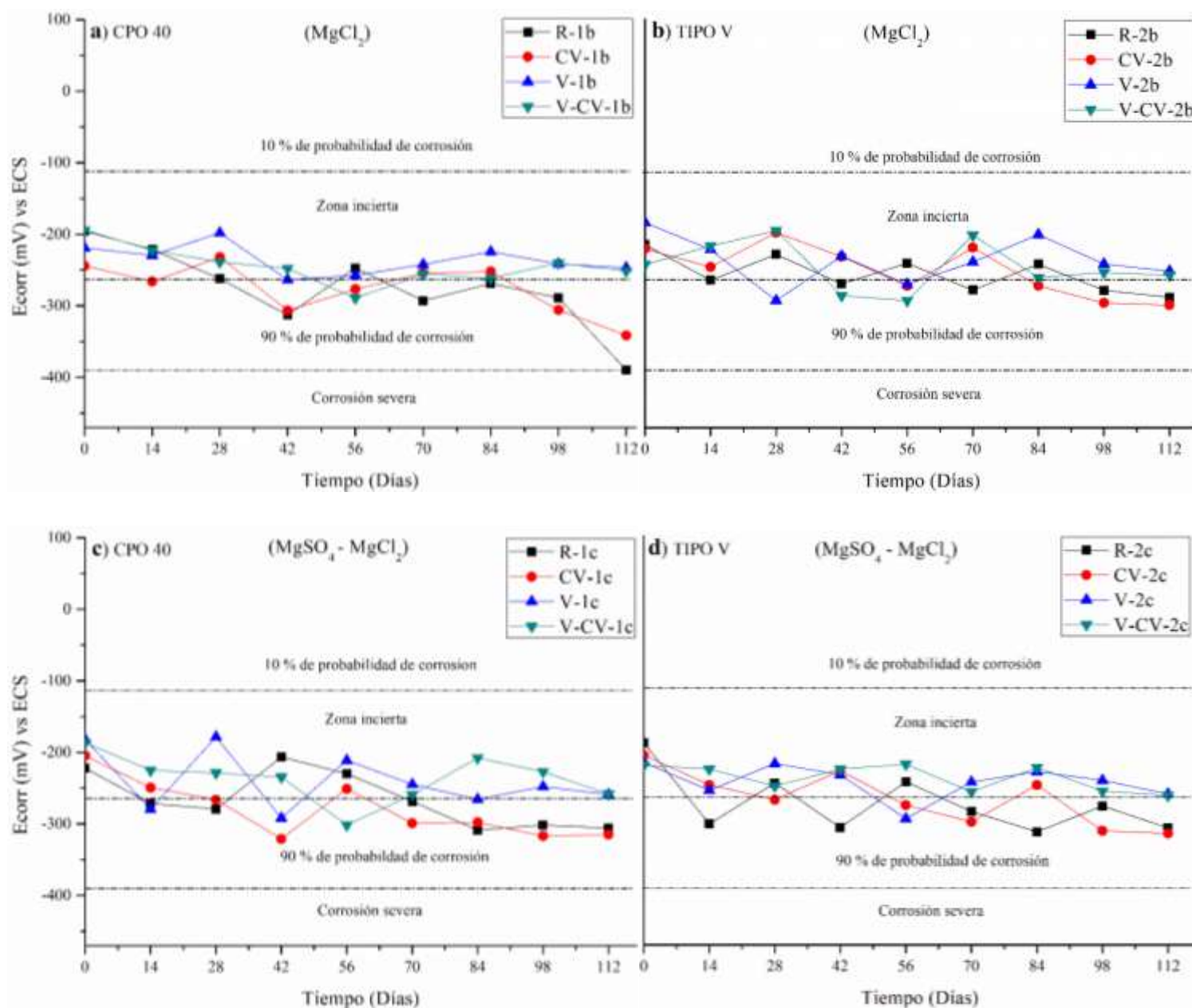


Figura 38. Potenciales de corrosión de barras de acero embebidas en especímenes de mortero elaborados de cemento CPO 40 (Figuras derecha) y TIPO V (Figuras izquierda), expuestos a solución de a), b) $MgCl_2$, y c), d) $MgSO_4 - MgCl_2$.

En la Figura 39, se muestran los resultados de potenciales de corrosión E_{corr} de mezclas de concreto de cemento CPO 40 y TIPO V en diferentes soluciones de exposición. El comportamiento que presentaron las mezclas R-1b, CV-1b, R-2b y CV-2b expuestas a solución de MgCl_2 , en edades iniciales, mostraron valores de potenciales situados dentro de una zona incierta, que indican un estado pasivo de la barra de refuerzo. Pero se observa que, en edades posteriores a partir a los 112 días de exposición, estas mezclas presentaron valores de potenciales negativos de -304, -289, -310 y -287 mV respectivamente, lo cual indica que existe un 90% de probabilidad de un evento de corrosión, esto acorde a la norma ASTM C 876.

En el caso de las mezclas R-1c, CV-1c, R-2c y CV-2c, expuestas en solución combinada de $\text{MgSO}_4 + \text{MgCl}_2$, en edades iniciales presentaron potenciales con valores de -199, -232, -217 y -203 mV respectivamente, que son valores que se encuentran de una zona incierta. En edades posteriores a los 112 días de exposición, presentaron valores de -320, -299, -310 y -303 mV, que son valores que indican un 90 % de probabilidad de que el evento de corrosión se presente.

En el caso de las mezclas V y V-CV en las Figura 39 (a), (b), (c) y (d) al igual que las mezclas de mortero de ambos cementos, en edades iniciales como en edades posteriores a los 112 días, presentaron valores de potenciales que se encuentran dentro de una zona incierta. Haciendo una comparación del comportamiento que presentaron estas mezclas en los resultados de resistencias a compresión y cambios de longitud, estas mezclas son las que mostraron un mejor desempeño frente a las diferentes soluciones de exposición.

En cuanto al comportamiento presentado por las mezclas de la Figura 39 de cemento CPO 40 y TIPO V no existió una gran diferencia entre sí, en su comportamiento, en comparación con las mezclas de mortero, que como se pudo observar las mezclas elaboradas de cemento CPO 40, mostraron una mayor probabilidad de corrosión, que las mezclas de cemento TIPO V.

CONCRETO DE CEMENTO CPO 40 Y CEMENTO TIPO V

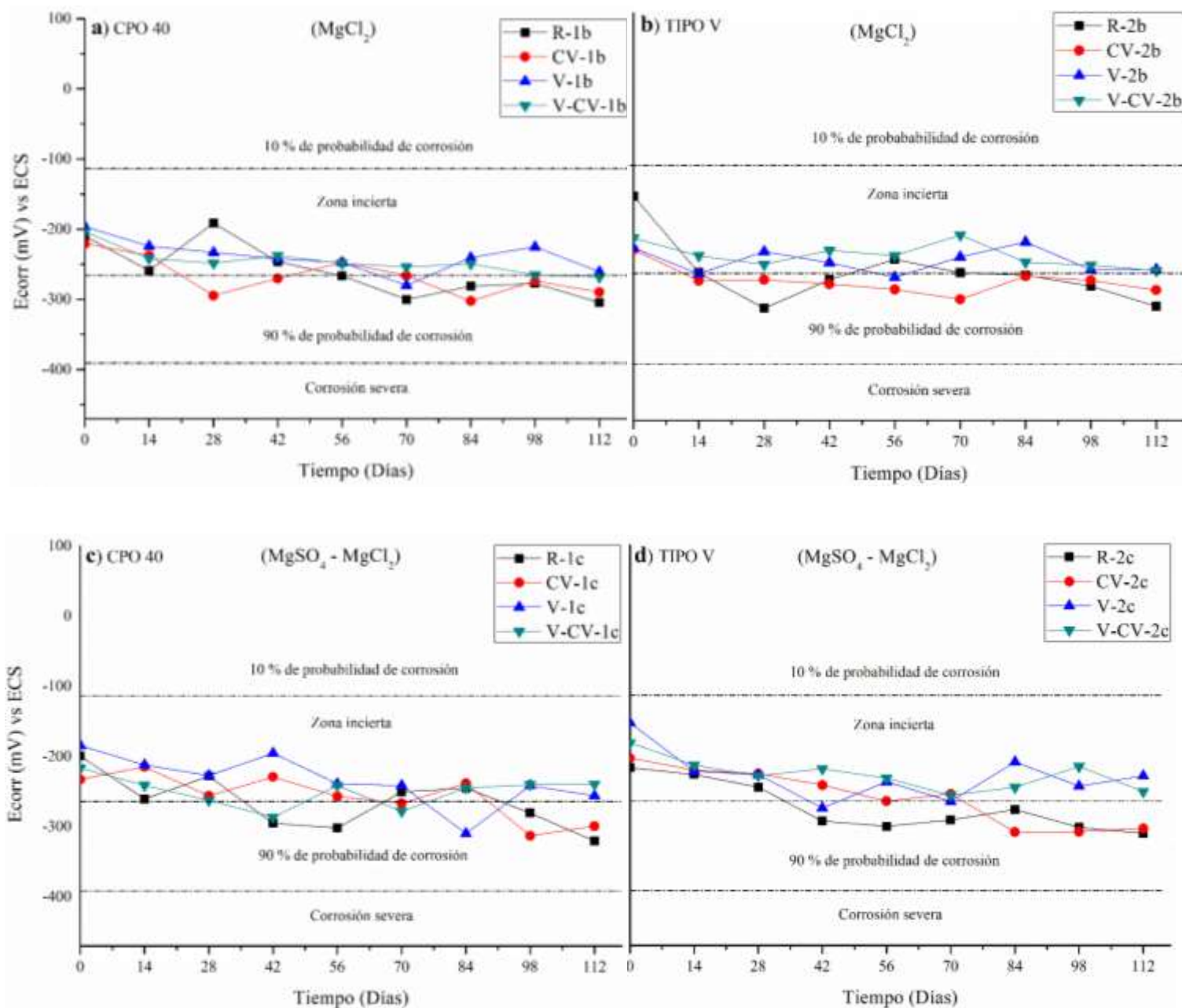


Figura 39. Potenciales de corrosión en barras de acero embebidas en especímenes de concreto elaborados de cemento CPO 40 (Figuras derechas) y TIPO V (Figuras izquierdas) expuestos a solución de a), b) $MgCl_2$ y c), d) $MgSO_4 - MgCl_2$.

Discusión de resultados de potenciales de corrosión (E_{corr})

Los resultados de potenciales de corrosión (E_{corr}) mostraron que las mezclas de referencia y las mezclas con sustitución de 20% CV, de mortero y concreto, elaboradas de cemento CPO 40 y TIPO V, en las soluciones de ensayo, fueron las mezclas que presentaron una mayor probabilidad de corrosión a los 112 días de exposición (ver Anexo A), en comparación con las mezclas V y V-CV. Esto puede ser atribuido a que tanto las mezclas de referencia como las mezclas de CV, no poseen la tecnología de curado interno que fue implementada en las otras mezclas, cuyo efecto es el de brindar una protección a través de una solución introducida, que propicia una mayor densificación de la matriz cementante, y la modificación de la viscosidad de la solución de poros, creando un efecto barrera, con el fin de reducir el ingreso de especies iónicas.

En el caso de las mezclas expuestas en solución de $MgSO_4 - MgCl_2$, presentaron potenciales que indicaban una actividad de corrosión del acero de refuerzo, tiempo antes que las mezclas expuestas en solución de $MgCl_2$. Este comportamiento puede atribuirse a que en la solución combinada, se presentó una interacción del SO_3 y el Cl^- con los productos de hidratación del cemento, donde existe una reacción preferencial del sulfato con el C_3A [101], para formar trisulfoaluminato de calcio hidratado (etringita) tardía y por tanto agrietamiento, permitiendo el ingreso de los iones cloruros con mayor facilidad, y por consecuencia, una mayor cantidad de cloruros libres que inducirán la corrosión de las barras de refuerzo. En la solución de cloruro de magnesio el mecanismo de corrosión se presenta de forma más lenta que en la solución combinada, debido a la ausencia de SO_3 en el medio de exposición, una parte de cloruros presentes, quedarán enlazados por medio de la reacción con el C_3A , resultando la formación de monocloroaluminato o sal de Friedel, el resto de los Cl^- ingresarán al interior de la matriz cementante propiciando la despasivación del acero de refuerzo, dando lugar a la corrosión. En este caso el inicio de la misma se presentará primero en las mezclas en solución combinada que en la solución con solo $MgCl_2$ [102].

En el caso de las mezclas V y V-CV de mortero y concreto, de ambos cementos, en las soluciones de ensayo, mostraron resultados de potenciales que indican un mejor desempeño a la probabilidad de corroerse, en comparación con los resultados mostrados por las mezclas R y CV. Lo cual indica que la tecnología VERDiCT implementada en estas mezclas resulta

benéfica, ya que, mediante la introducción de una solución de agua y un aditivo reductor de la contracción, se puede proporcionar un aumento de la viscosidad de la solución de los poros, originando una disminución del transporte difusivo de especies iónicas. Otro aspecto es que, gracias a la fuente de agua adicional proporcionada por el curado interno, se puede lograr una mayor hidratación de la pasta de cemento, y con esto una mayor densificación de la matriz cementante.

Aunado a lo descrito anteriormente, retomando el comportamiento que presentaron las mezclas V y V-CV, que incluyen el curado interno, en los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión y cambios de longitud, se pudo observar que estas mezclas, fueron las que presentaron el mejor desempeño, frente a los ambientes de exposición a los que fueron sometidas, dicho comportamiento se mantuvo independientemente del tipo de cemento utilizado y si eran mezclas de mortero y concreto.

En las mezclas con CV, los resultados presentados por las mezclas V-CV, en comparación con las mezclas CV, mostraron que estas mezclas fueron las que obtuvieron un mejor desempeño en los dos ambientes de exposición. Siendo esto atribuible al buen funcionamiento de la tecnología VERDiCT, que forma una barrera, para reducir el ingreso de especies iónicas que pudieran difundirse hacia el interior de la matriz cementante. En cuanto al comportamiento que mostraron las mezclas V-CV en comparación con las mezclas V, no presentaron gran diferencia entre sí, esto se debe a que la CV reacciona de forma muy lenta, de tal forma que su efecto se puede manifestar a largo plazo, si se toma en cuenta que la CV fue utilizada tal como fue extraída de la planta, sin tratamiento alguno, y como se pudo observar en la caracterización mediante MEB-EDS esta ceniza posee un alto contenido de carbono el cual actúa como material inerte. Las características mencionadas de manera previa con respecto a la CV, pueden intervenir en el desempeño esperado por la misma, por lo que en lugar de reaccionar el 20% de CV sustituido, estaría reaccionando un porcentaje de CV menor.

5.2.3.2. *Densidad de corriente de corrosión o velocidad de corrosión (I_{corr}).*

La densidad de corriente de corrosión indica cuál de las muestras se corroe con mayor rapidez con respecto al tiempo de exposición, por tal razón a este parámetro también se le conoce como velocidad de corrosión, y en general es resultado de la despasivación del acero de refuerzo que para nuestro caso está relacionada con el contenido de cloruros. La densidad de corriente de corrosión depende de la especie iónica, cantidad de la misma y la disponibilidad de oxígeno. Otro medio para observar el comportamiento que presentan las mezclas en estudio con mayor claridad es, la densidad de corriente de corrosión acumulada o velocidad de corrosión acumulada, que es una herramienta útil que permite conocer con detalle, de forma cualitativa los periodos de iniciación y propagación de la corrosión en el acero de refuerzo, esta técnica parece un mejor elemento para la interpretación detallada para estudiar el efecto de las diferentes variables de las mezclas [103].

5.2.3.3. *Descripción de resultados de velocidades de corrosión*

En los resultados de velocidad de corrosión I_{corr} de las siguientes Figuras, se puede observar que previo al inicio de la corrosión, los valores de las barras de refuerzo, de cada una de las mezclas, se sitúan por debajo de $0.1 \mu A / cm^2$, que algunos autores indican, como una zona en la que la barra de refuerzo, embebido en una mezcla de mortero o concreto, se encuentra en una zona donde se considera despreciable (la barra se encuentra en estado pasivo) [93].

La Figura 40 muestra los valores de velocidad de corrosión (I_{corr}) de mezclas de mortero y concreto de CPO 40, medidos durante 112 días de exposición, haciendo una comparativa de los resultados de potenciales de corrosión, se observa que de igual forma, las mezclas que presentaron mayor velocidad de corrosión a los 112 días de exposición en las soluciones de ensayo, son las mezclas M-R, M-CV, aunque se mantienen por debajo del límite de corrosión moderada, son las que presentan una mayor probabilidad de corrosión, en las gráficas también se puede observar una mayor afectación de las mezclas R y CV de mortero que en las mezclas de concreto, mientras que las mezclas con la tecnología VERDiCT M-V, M-V-CV, C-V y C-V-CV en las diferentes soluciones de ensayo, se mantienen dentro una zona donde el nivel de corrosión se considera despreciable a lo largo del tiempo de exposición.

En la Figura 40 **(a)** y **(b)** de velocidad de corrosión acumulada, se puede observar de forma más detallada, el tiempo de inicio de la actividad de corrosión de cada mezcla, donde se puede apreciar que las mezclas de mortero son las que presentaron mayor probabilidad de corrosión en comparación con las mezclas de concreto, de tal forma que, en la mezcla M-R se presentó el punto de inflexión a los 42 días, tiempo antes que las mezclas M-CV que dicho punto se presentó a los 84 días como se indica en la Figura 40, mientras que las mezclas de concreto a los 112 días no mostraron dicho punto de inflexión que indique probabilidad de corrosión. En el caso de las mezclas V y V-CV de mortero y concreto, se observa que su comportamiento se muestra de forma lineal con respecto al tiempo de exposición.

MORTERO Y CONCRETO DE CEMENTO CPO 40

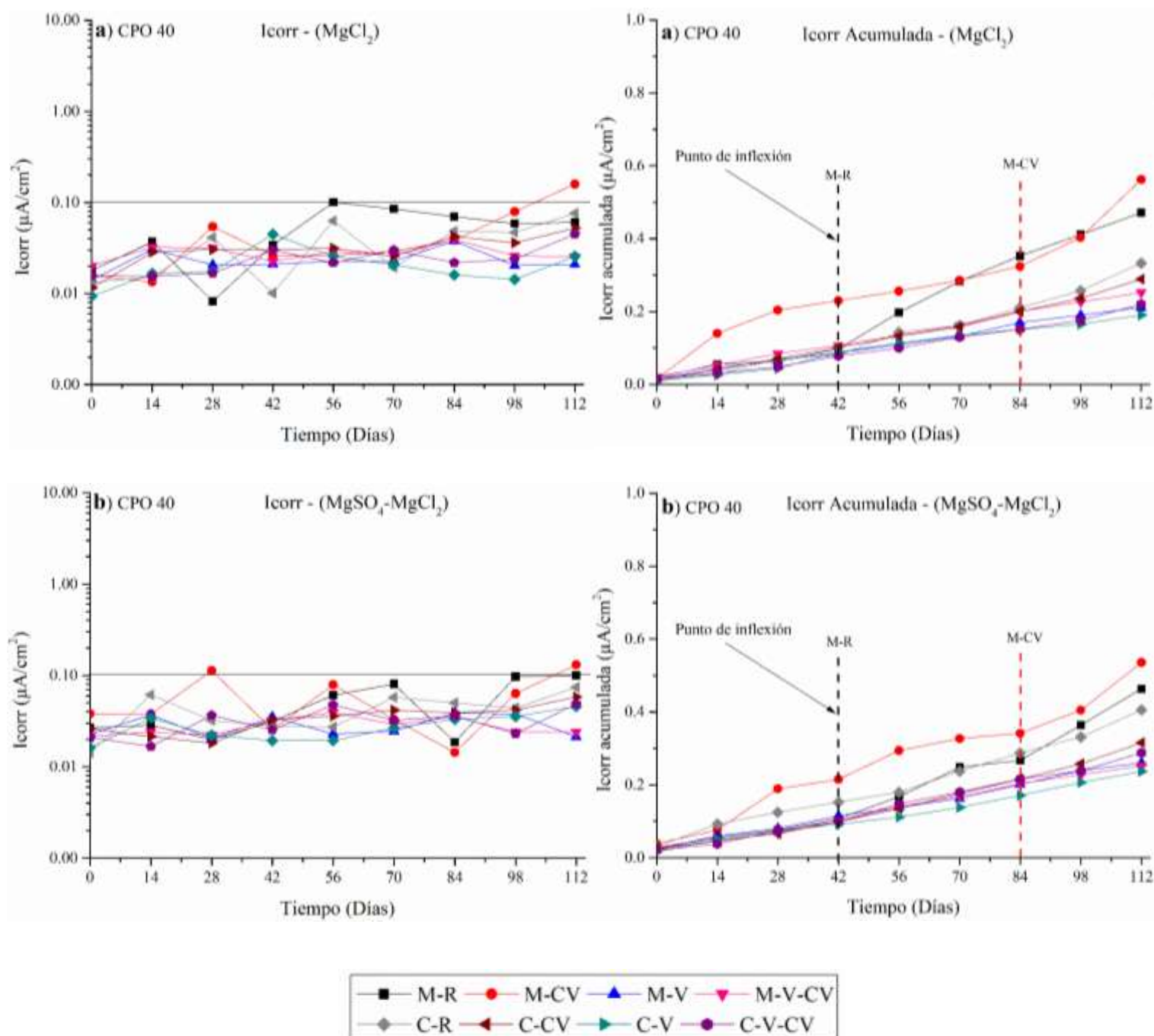


Figura 40. Densidad de corriente de corrosión y densidad de corriente de corrosión acumulada, de barras de acero en especímenes de mortero y concreto de cemento CPO 40 expuestos a solución de a) $MgCl_2$, y b) $MgSO_4 - MgCl_2$.

En la Figura 41 se muestran los resultados de velocidades de corrosión (I_{corr}) de mezclas de mortero y concreto de cemento TIPO V, Al igual que las mezclas de mortero y concreto de cemento portland, en edades iniciales todas las mezclas muestran velocidades de corrosión entre 0.01 y 0.05 $\mu A/cm^2$, pero en edades posteriores a los 112 días se observa un incremento en las velocidades de corrosión cercano al 0.1 $\mu A/cm^2$, aunque aún se mantienen en una zona, donde el nivel de corrosión se considera despreciable.

En los resultados mostrados, se observa que al igual que las mezclas de cemento portland, los sistemas R y CV de mortero y concreto de cemento TIPO V, en las diferentes soluciones, presentaron un comportamiento similar, con mayores velocidades de corrosión, en comparación con las mezclas V y CV. A diferencia de los sistemas elaborados de cemento portland estos sistemas no presentaron un punto de inflexión que indique una mayor probabilidad de corrosión.

En el caso de las mezclas M-V, M-V-CV, C-V, y C-V-CV, al igual que las mezclas de mortero y concreto de cemento CPO 40, son las mezclas que mostraron un mejor desempeño hasta los 112 días de exposición, en comparación con las otras mezclas (M-R, M-CV, C-R y C-CV) . De acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas de potenciales de corrosión, independientemente de la solución de exposición, los sistemas con tecnología VERDiCT son las que presentaron un comportamiento más favorable frente a las soluciones de ensayo.

En la Figura 41 **(a)** y **(b)** de I_{corr} acumulada, se observa con mayor detalle el comportamiento presentado por cada una de las mezclas, en las soluciones de exposición. En estas figuras se puede observar que efectivamente las mezclas R y CV de mortero y concreto son las que presentan mayor tendencia a corroerse, mientras que las mezclas con tecnología VERDiCT siguen presentando un mejor comportamiento a los 112 días. Dicha tendencia se presenta de forma lineal, independientemente de la solución de exposición o si es mortero o concreto.

MORTERO Y CONCRETO DE CEMENTO TIPO V

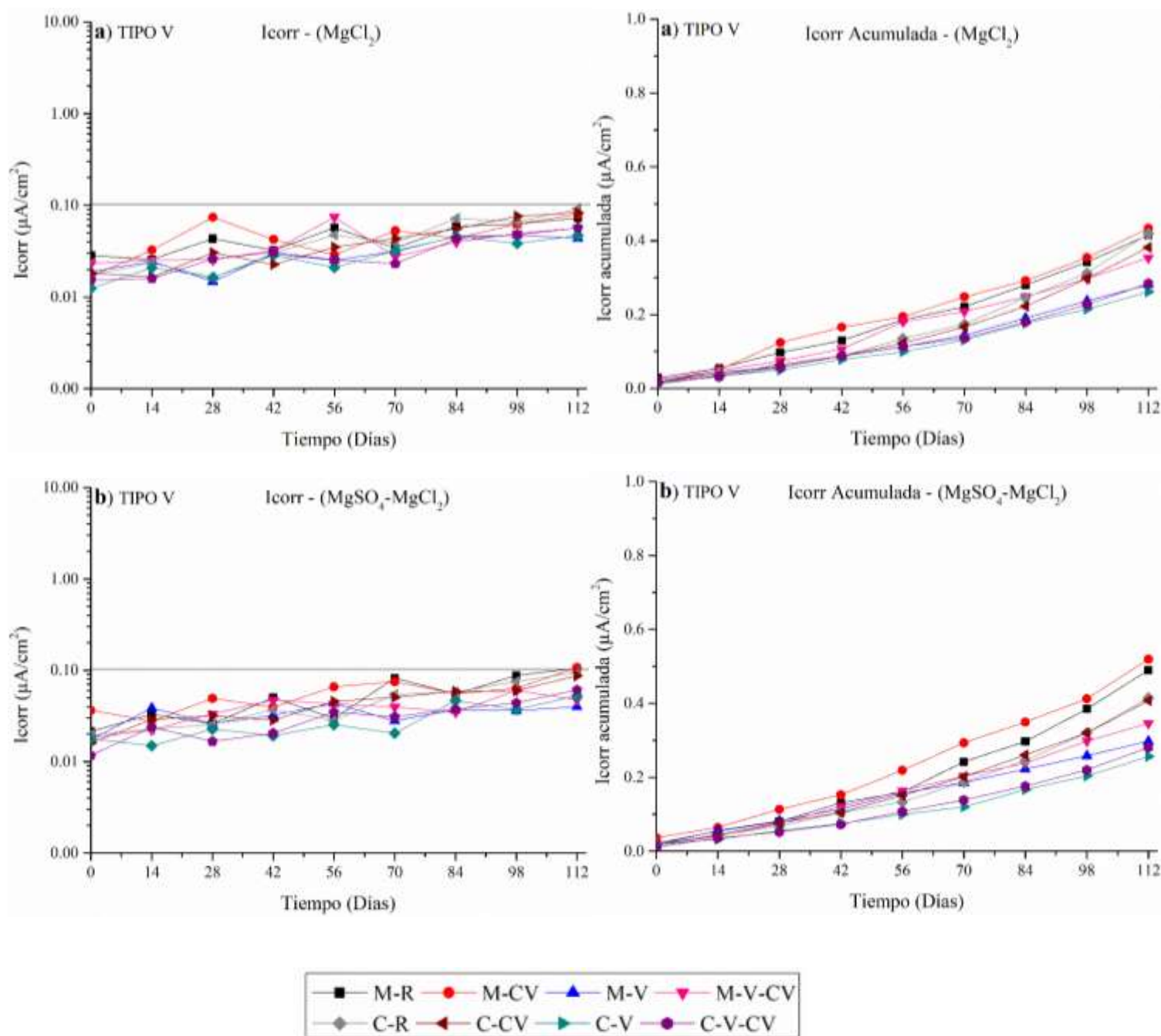


Figura 41. Densidad de corriente de corrosión y densidad de corriente de corrosión acumulada, de barras de acero en especímenes de mortero y concreto de cemento TIPO V expuestos a solución de a) MgCl₂, y b) MgSO₄ - MgCl₂.

Discusión de resultados de densidad de corriente de corrosión (I_{corr})

Los resultados de velocidad de corrosión de las mezclas R y CV de mortero y concreto elaboradas de cemento CPO 40 y TIPO V, mostraron que estas fueron las mezclas con una mayor tendencia a corroerse, en comparación con las mezclas V y V-CV. Con esto se corrobora el comportamiento que presentaron dichas mezclas en los resultados de resistencia a compresión y cambios de longitud. Las velocidades de corrosión mayores, presentadas por las mezclas R y CV frente a las soluciones de exposición, se pueden atribuir a que a diferencia de las mezclas con tecnología VERDiCT, estas dos mezclas por su naturaleza presentan mayor porosidad, y debido a esto se pudo haber presentado un mayor ingreso de especies iónicas.

Las velocidades de corrosión de las mezclas R y CV de concreto, fueron menores en comparación con las de mortero, esto puede atribuirse a una disminución en la pasta de la mezcla, la cual es reemplazada por el agregado grueso, lo que da lugar a una disminución de porosidad interconectada, por medio de la cual se presenta el transporte difusivo de especies iónicas, y como consecuencia se pudiera presentar un mecanismo de transporte de forma más lenta en las mezclas de concreto que en las de mortero.

El desempeño que presentan las mezclas con tecnología VERDiCT (V y V-CV) de mortero y concreto, de cemento CPO 40 y TIPO V, indica un mejor comportamiento electroquímico frente a las soluciones de exposición, en comparación con el comportamiento que presentaron las mezclas R y CV. Esto puede ser atribuible a dos acciones que presenta la tecnología: Primera, modifica la viscosidad de la solución de los poros, con el fin de reducir el ingreso de las especies iónicas de las soluciones de ensayo, formando un efecto barrero. Segunda, provee una mayor hidratación de las fases del cemento, generada por el agua adicional disponible, proporcionada por el curado interno, dando lugar a la densificación de la matriz cementante, y la consecuente disminución de porosidad, por medio de la cual se presenta el transporte difusivo de especies perjudiciales, por lo que el efecto que se presenta por la tecnología VERDiCT, resulta efectiva ante el ingreso de especies iónicas perjudiciales, que pudieran causar un daño gradual del material. Retomando el comportamiento que presentaron las mezclas V y V-CV en los resultados de las pruebas de resistencia a compresión, cambios de longitud y potenciales de corrosión, se observa que estas mezclas, son las que presentan

el mejor desempeño, independientemente de la solución a la cual fueron sometidas y del cemento del cual fueron elaboradas.

Con relación a los resultados mostrados por los sistemas que contienen CV, se observó que hasta el tiempo de ensayo, no mostraron efecto alguno debido a la presencia de este material, esto puede ser atribuible a que el efecto puzolánico de la CV, no se estuviera presentando hasta el tiempo de ensayo, además, como se mencionó de manera previa, la CV fue utilizada tal y como fue extraída de la planta, sin tratamiento previo, y que es un material que posee un porcentaje alto de partículas de carbono que pueden estar presentes de forma inherente, por lo que se cree que del porcentaje de ceniza reemplazado, solo estuviera reaccionando una parte.

Cabe mencionar que el tipo de solución juega un papel importante, ya que se pudo observar que las mezclas R y CV de mortero y concreto, de ambos cementos utilizados, expuestas en solución de $\text{MgSO}_4 - \text{MgCl}_2$, presentaron mayor velocidad de corrosión del acero de refuerzo, que las mezclas expuestas en solución de MgCl_2 . Este comportamiento se puede atribuir a que en la solución combinada, se presenta una interacción del SO_3 y el Cl^- con los productos de hidratación del cemento especialmente C_3A . De la interacción de estos dos iones con el C_3A , el que presenta mayor afinidad con esta fase es el sulfato que promueve la formación de trisulfoaluminato de calcio hidratado (etringita), debido a esto, en la pasta existe una mayor cantidad de cloruros libres que podrían inducir la corrosión por picadura en las barras de refuerzo. En la solución de cloruro de magnesio, existe un enlace de los iones cloruro con el C_3A , formando monocloroaluminato o sal de Friedel, por lo que a diferencia de la solución combinada, el ion cloruro no compite con el SO_3 en el medio de exposición, permitiendo el ingreso de los Cl^- (cloruros libres) al interior de la matriz cementante, propiciando la despasivación del acero de refuerzo, y por tanto generando un evento de corrosión, de tal forma que el inicio de la misma se presentará primero en las mezclas en solución combinada que en la solución con solo MgCl_2 .

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

El principal objetivo del presente estudio fue investigar el uso de la tecnología VERDiCT, con el fin de mitigar el ingreso de los iones sulfato y cloruro, en mezclas de mortero y concreto elaboradas de con dos tipos de cementos: CPO 40 y tipo V.

1. En los resultados de resistencias a compresión, las mezclas de mortero y concreto presentaron decrementos en la resistencia mecánica, independiente del tipo de cemento utilizado. Esto es debido a que los sistemas fueron afectados por la presencia de iones Mg^{2+} , los cuales ocasionaron una descalcificación del gel C-S-H para dar paso a la formación de gel M-S-H.
2. Las mezclas de CPO 40, en comparación con las mezclas de cemento Tipo V, mostraron mayores porcentajes de expansión lineal. Esto es atribuible a la probable formación de etringita, debido a la presencia de sulfatos en las soluciones de exposición, así como al mayor porcentaje de la fase aluminato en el CPO 40.
3. El uso de la tecnología VERDiCT, resultó efectiva en la mitigación del ingreso de especies iónicas presentes en diferentes ambientes, tanto para mezclas de mortero como de concreto, independientemente del tipo de cemento utilizado y el medio de exposición, dado que promovió la modificación de la viscosidad de la solución de poro y la densificación de la matriz cementante.
4. Las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas que contenían un remplazo parcial de un 20% de cemento por CV, resultaron afectadas por los medios de exposición, de la misma forma que las mezclas de referencia. Esto es debido a que no se presentó el efecto puzolánico de la CV a lo largo del tiempo de exposición, dejando así vulnerables a los sistemas frente al ingreso de agentes agresivos.
5. De las soluciones utilizadas como medios de exposición para el deterioro de las muestras, la solución combinada de $MgSO_4 + MgCl_2$ resultó ser más perjudicial que las soluciones individuales de $MgSO_4$ y $MgCl_2$, esto fue evidenciado, de forma general, en los resultados de las diferentes pruebas realizadas.
6. El uso de un cemento resistente a los sulfatos no resulta efectivo frente a la exposición de soluciones con altos contenidos de iones Cl^- . Esto es debido a una disminución en el contenido del C_3A con el cual estos iones pueden ser afines.

Recomendaciones

1. Los resultados hasta ahora obtenidos en las pruebas electroquímicas, de potenciales de corrosión (E_{corr}) y densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), no permiten llegar a una conclusión concreta, debido a que el tiempo de exposición de las mezclas, no mostraron una actividad de corrosión, indicando una despasivación del acero de refuerzo, sugiriendo mayor tiempo de exposición para poder realizar un mejor análisis.
2. Se recomienda para investigaciones posteriores, realizar caracterización mediante MEB-EDS y DRX de cada uno de los sistemas, con el fin de verificar la formación de productos perjudiciales presentes en la matriz de cemento.
3. Con base a los resultados obtenidos, se pudo observar que las mezclas de mortero, resultaron mayormente afectadas que las mezclas de concreto frente al ataque de sulfatos, por lo que se sugiere mayor investigación para corroborar la aplicación de la normativa vigente de morteros en mezclas de concreto.

Anexo A. Cambios de longitud

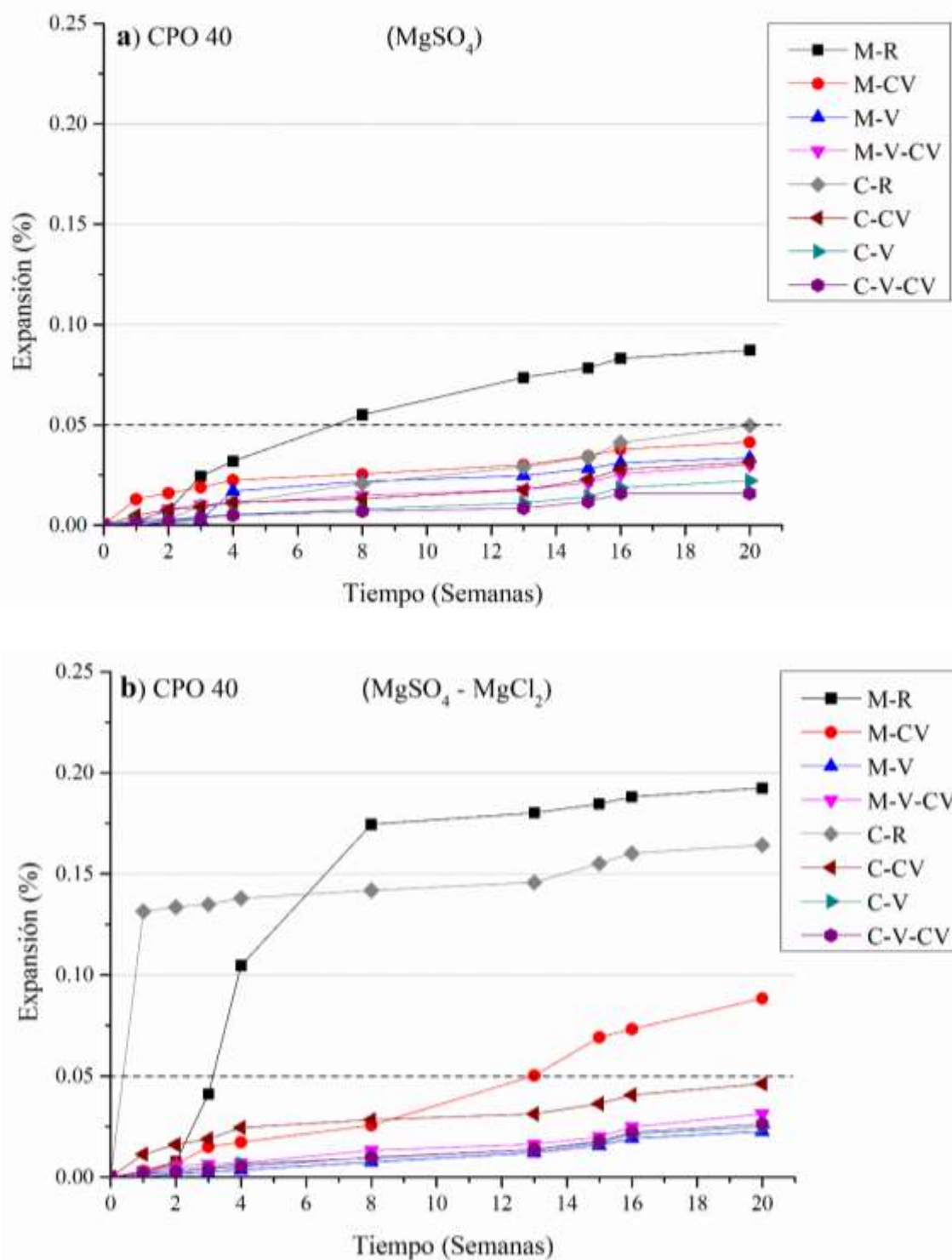


Figura 42. Cambios de longitud de mezclas de mortero y concreto de cemento portland en solución de a) $MgSO_4$ y b) $MgSO_4 - MgCl_2$.

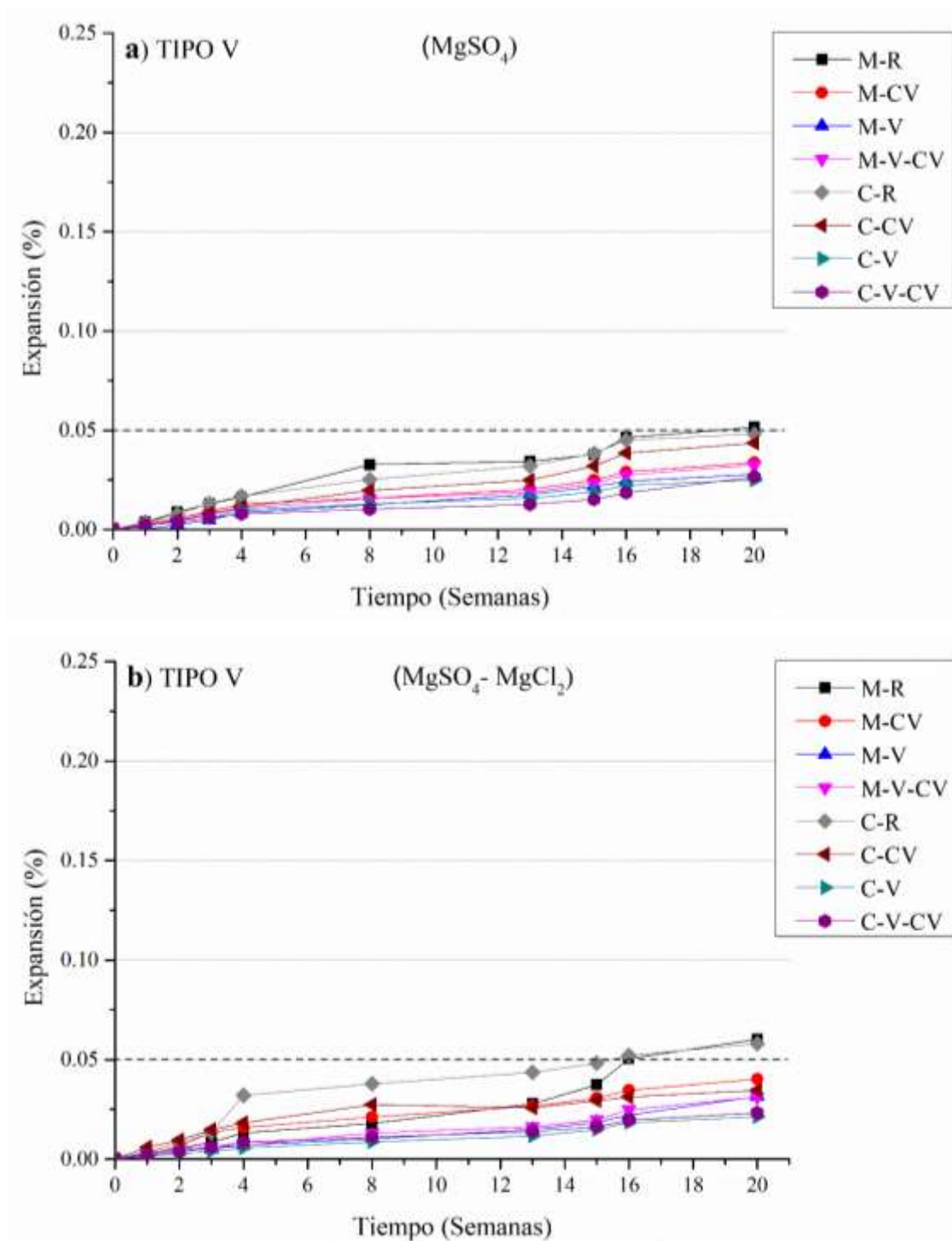


Figura 43. Cambios de longitud de mezclas de mortero y concreto de cemento TIPO V en solución de a) MgSO₄ y b) MgSO₄ - MgCl₂.

Anexo B. Potenciales de corrosión (E_{corr})

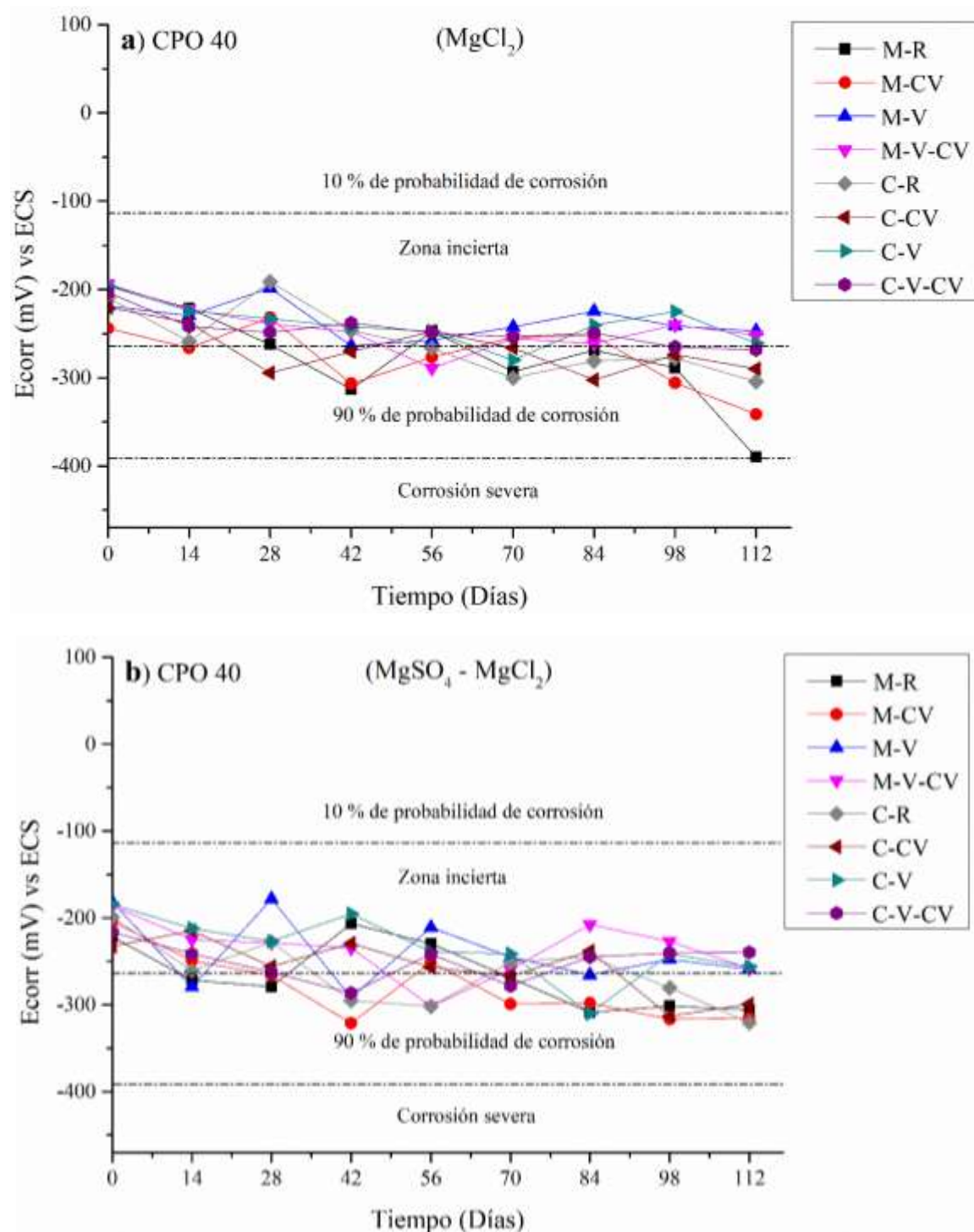


Figura 44. Potenciales de corrosión de mezclas de mortero y concreto de cemento portland en solución de a) $MgCl_2$ y b) $MgSO_4 - MgCl_2$.

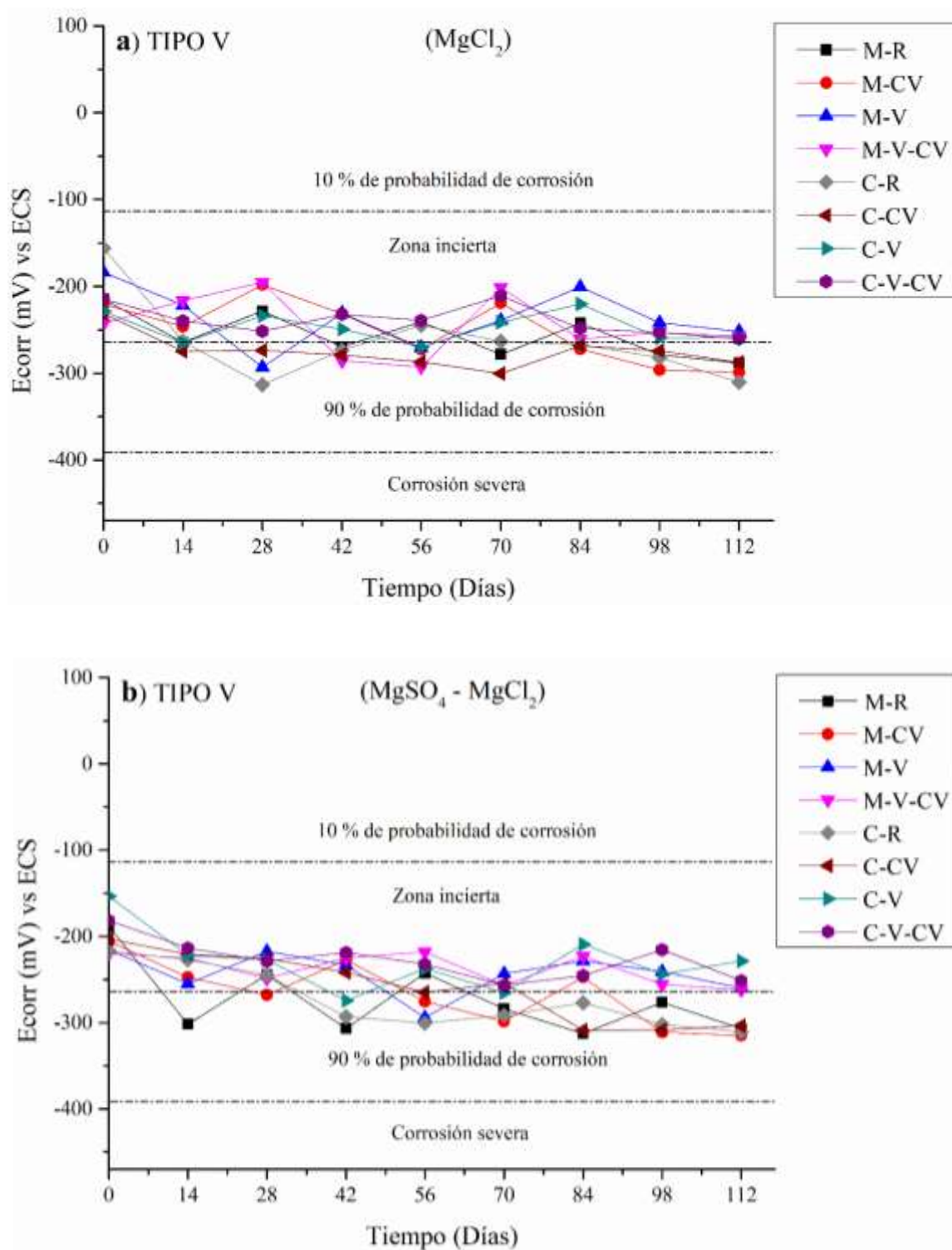


Figura 45. Potenciales de corrosión de mezclas de mortero y concreto de cemento TIPO V en solución de a) MgCl₂ y b) MgSO₄ - MgCl₂.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Imcyc, Propiedades del concreto, in: Conceptos Basicos, (2004) pp. 9-15.
- [2] B. Metz, O. Davidson, D.H. Conink, M. Loos, L. Mayer, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge, United Kingdom, (2005).
- [3] P. Kumar Mehta, Concrete technology for sustainable development, Concr. Int. 21 (1999) pp. 47-53.
- [4] A.J. Schokker, The Sustainable Concrete Guide - Strategies and Examples, Farmington Hills, Michigan USA, (2010).
- [5] Task Group 3.8 within Commission 3, Guidelines for green concrete structures (fib Bulletin No. 67). International federation for structural concrete, Lausanne, Switzerland, (2012).
- [6] Cembureau, Annual report 2011, Eur. Cem. Assoc. (2001) pp. 40.
- [7] O.E. Gjörv, Durability of Concrete Structures, Arab J Sci Eng. 36 (2011) pp. 151-172.
- [8] J.M. Mendoza-Rangel, P. Castro-Borges, Credibility of concepts and models about service life of concrete structures in the face of the effects of the global climatic change. A critical review, Constr. Mater. 59 (2009) pp. 117-124.
- [9] P. Castro-Borges, R. Castillo, J. Carpio, J. Genesca, P. Helene, E. Lopez, Corrosión en estructuras de concreto armado, teorías, inspección, diagnóstico, Vida útil y reparación, IMCYC. (1998).
- [10] J.A. González, C. Andrade, M.L. Escudero, Corrosión de las Armaduras por Carbonatación del Concreto, Rev. Iberoam. Corros. y Protección. 15 (1984) pp. 11-19.
- [11] J.M. Mendoza-rangel, P. Castro-borges, P. Quintana-owen, M. Balancan-zapata, J.A. Cabrera-madrid, Chemical Interactions in Reinforced Concrete Exposed at a Tropical Marine Environment, J. Chem. (2015) pp. 5.
- [12] J.P. Jackson, Portland cement: Clasification and Manufacture, 4th ed., Elsevier Science & Technology Books, (2004).
- [13] F. Sorrentino, Chemistry and Engineering of the Production Process : State of the Art, Cem. Concr. Res. 41 (2011) pp. 616-623.

-
- [14] ASTM International, Standard Specification for Portland Cement, Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2009) pp. 1-10.
 - [15] ASTM International, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2010) pp. 1-6.
 - [16] ACI Commite 212, Chemical Admixtures for Concrete, Educ. Bull. E4-03. (2003).
 - [17] K. Kim, M. Shin, S. Cha, Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability, Constr. Build. Mater. 48 (2013) pp. 499-507.
 - [18] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta, E. Gartner, Cement and Carbon Emissions, Mater. Struct. 47 (2014) pp. 1055-1065.
 - [19] R. Nikzard, “Greenhouse Gas Emissions and Green Technologies in Canada”, Environ. Dev. (n.d.).
 - [20] E. Gartner, H. Hirao, A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete, Cem. Concr. Res. (2015) pp. 126-142.
 - [21] P.C. Aitcin, Binders for Durable and Sustainable Concrete, Modern Con, (2008) pp. 500.
 - [22] S. Chandra, L. Berntsson., “Use of Silica Fume in Concrete” Waste Materials Used in Concrete Manufacturing, (1996) pp. 554-623.
 - [23] T. Books, Lea ’ s Chemistry of Cement and Concrete, Cuarta Edi, Ed. Elsevier, (2004).
 - [24] T. Nochaiya, W. Wongkeo, A. Chaipanich, Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete, Fuel. 89 (2010) pp. 768-774.
 - [25] V.G. Papadakis, Effect of fly ash on Portland cement systems. Part 1: Low calcium fly ash, Cem. Concr. Res. 29 (1999) pp. 1727-1736.
 - [26] C. Cheng, S. Wei, Q. Honggen, The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash, Cem. Concr. Compos. 30 (2000) pp. 71-75.
 - [27] J.I. Escalante - Garcia, Materiales Alternativos al Cemento Pórtland, Av. y Perspect. 21 (2002) pp. 79-88.
 - [28] C.A. 201, Guide to Durable Concrete, Detroit, (1990) pp.41.
 - [29] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, Corrosion Of Steel in Concrete,
-

- WLEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim., Weinheim, (2004) pp. 394.
- [30] A.M. Neville, Properties of Concrete, 5a ed., Pearson Education Limited, Essex, (2011).
 - [31] W. Kurdowski, Cement and Concrete Chemistry, 1a ed., Springer, (2014) pp. 667.
 - [32] S.H. Kosmatka, B. Kerkhof, W.C. Panarese, J. Tanesi, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, (2004) pp.1-459.
 - [33] A.M. Neville, Properties of Concrete, 4a. Edición, IMCyC, (1999).
 - [34] J.A. González, J.M. Miranda-Vidalez, Corrosión en las estructuras de concreto armado: Fundamentos, medida, diagnosis y prevención, Cons. Super. Investig. Cient. (2007) pp. 433.
 - [35] A. Bonakdar, B. Mobasher, Multi-parameter Study of External Sulfate Attack in Blended Cement Materials, Constr. Build. Mater. 24 (2010) pp. 61-70.
 - [36] J. Chen, M. Jiang, Long-term Evolution of Delayed Ettringite and Gypsum in Portland Cement Mortars Under Sulfate Erosion, Constr. Build. Mater. 23 (2009) pp. 812-816.
 - [37] E. Rozière, A. Loukili, R. El Hachem, F. Grondin, Durability of Concrete Exposed to Leaching and External Sulphate Attacks, Cem. Concr. Res. 39 (2009) pp. 1188-1198.
 - [38] J. Chen, M. Jiang, J. Zhu, Damage Evolution in Cement Mortar Due to Erosion of Sulphate, Corros. Sci. 50 (2008) pp. 2478-2483.
 - [39] P.J.M. Monteiro, K.E. Kurtis, Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack, Cem. Concr. Res. 33 (2003) pp. 987-993.
 - [40] A. Neville, The confused world of sulfate attack on concrete, Cem. Concr. Res. 34 (2004) pp. 1275-1296.
 - [41] J.P. Skalny, J. Marchand, I. Odler, Sulfate Attack on Concrete, Taylor & F, London and New York, (2003) pp. 232.
 - [42] B. Al-amoudi, S. Omar, Attack on Plain and Blended Cements Exposed to Aggressive Sulfate Environments, Cem. Concr. Compos. 24 (2002) pp. 305-316.
 - [43] Imcyc, Cementos y Concretos Resistentes a los Sulfatos, in: Probl. Causas y Soluciones, (2006) pp. 43-47.
 - [44] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, Concrete Microstructure Properties, and Materials, 3 rd, (2006) pp. 659.
 - [45] J. Zuquan, S. Wei, Z. Yunsheng, J. Jinyang, L. Jianzhong, Interaction Between Sulfate

- and Chloride Solution Attack of Concretes With and Without Fly ash, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) pp. 1223-1232.
- [46] American Concrete Institute, 308R, Guide To Curing Concrete, Farmington Hills, Michigan USA, (2001).
- [47] D.P. Bentz, W.J. Weiss, Internal Curing : A 2010 State-of-the- Art Review, *Natl. Inst. Stand. Technol. Rep.* 7765. (2011) pp. 82.
- [48] K. Kovler, O.M. Jensen, Internal Curing of Concrete, State of the Art Report of RLEM Technical Committee 196-ICC, France, Bagneux, (2007) pp. 139.
- [49] S. Weber, H.W. Reinhardt, A New Generation of High Performance Concrete : Concrete with Autogenous Curing, *Adv. Cem. Based Mater.* 7355 (1997) pp. 59-68.
- [50] O.M. Jensen, P.F. Hansen, Water-Entrained Cement-Based Materials I. Principles and Theoretical Background, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) pp. 647-654.
- [51] D.P. Bentz, Capitalizing on Self-Desiccation for Autogenous Distribution Of Chemical Admixture, in: D. Pearson, D.P. Bentz, L. Nilsson (Eds.), *Proc. 4th Int. Semin. Self-Desiccation Its Importance Concr. Technol.*, (2005) pp. 189-196.
- [52] B.D.P. Bentz, M.A. Peltz, K.A. Snyder, J.M. Davis, VERDiCT : Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology A new approach to decreasing transport, *Concr. Int.* (2009) pp. 31-36.
- [53] D.P. Bentz, K.A. Snyder, L.C. Cass, M.A. Peltz, Doubling the service life of concrete structures . I : Reducing ion mobility using nanoscale viscosity modifiers, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) pp. 674-678.
- [54] P.K. Mehta, Mechanism of Expansion Associated With Ettringite Formation, *Cem. Concr. Res.* 3 (1973) pp. 1-6.
- [55] H. La Jara Santos, Evaluación del comportamiento de cementos portland frente al ataque por sulfatos, (1996) pp. 1-17.
- [56] E.E. Hekal, E. Kishar, H. Mostafa, Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) pp. 1421-1427.
- [57] S. Thokchom, P. Ghosh, S. Ghosh, Performance of Fly ash Based Geopolymer Mortars in Sulphate Solution, 3 (2010) pp. 36-40.
- [58] W. Garzón Pire, Estudio de Durabilidad al Ataque de Sulfatos del Cconcreto con

- Agregado Reciclado, (2013) pp. 137.
- [59] D.P. Bentz, K.A. Snyder, M.A. Peltz, Doubling the service life of concrete structures. II : Performance of nanoscale viscosity modifiers in mortars, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) pp. 187-193.
 - [60] K.A. Snyder, D.P. Bentz, J.M. Davis, Using Viscosity Modifiers to Reduce Effective Diffusivity in Mortars, *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (2012) pp. 1017-1024.
 - [61] D.P. Bentz, J.M. Davis, M.A. Peltz, K.A. Snyder, Influence of Internal Curing and Viscosity Modifiers on Resistance to Sulfate Attack, *Mater. Struct.* no. 47 (2013) pp. 581-589.
 - [62] NMX-C-414-ONCE, Industria de la Construcción – Cementos hidráulicos-Especificaciones y número de prueba, (2004).
 - [63] ASTM International, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.01 (2009) pp. 1-3.
 - [64] ASTM International, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2008) pp. 1-4.
 - [65] ASTM International, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2007) pp. 1-10.
 - [66] ASTM International, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2006) pp. 1-5.
 - [67] ASTM International, Standard Specification for Concrete Aggregates, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2008) pp. 1 11.
 - [68] ASTM International, Standard Test Method for Bulk Density (“ Unit Weight ”) and Voids in Aggregate, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2009) pp. 1-5.
 - [69] ASTM International, Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2007) pp. 1-6.
 - [70] ASTM International, Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2007) pp. 1-7.
 - [71] ASTM International, Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal

- Curing of Concrete, Annu. B. ASTM Stand. (2012) pp. 1-8.
- [72] H.F.W. Taylor, Cement Chemistry, 2nd Ed., Thomas Telford Publishing, (1997.)
- [73] ASTM International, Standard Practice for Preparing , Cleaning , and Evaluating Corrosion Test Specimens, Annu. B. ASTM Stand. (2003) pp. 1-9.
- [74] ASTM International, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2007) pp. 1-8.
- [75] ASTM International, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2006) pp. 1-3.
- [76] ASTM International, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens), Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2008) pp. 1-9.
- [77] L. Shondeep, X.A. Sarkar, J. Dipayan, Scanning electron microscopy, X-Ray microanalysis of concretes. Handbook of Analytical Techniques in concrete Science and Technology, (2001) pp. 231-274.
- [78] R.X. Magallanes-Rivera, Efecto de la formulación y las condiciones de curado sobre los productos de hidratación y desarrollo de propiedades en materiales de construcción a base de yeso, Ph.D. Thesis, Cinvestav, IPN, Coahuila, México, (2009) pp. 177.
- [79] A.K. Chatterjee, Handbook of analytical techniques in concrete science and technology, Building M, Cap. 8 Editado por V.S. Ramachandran y James J Beaudoin, William Andrew Inc, (2001) pp.275-332.
- [80] Extraído de sitio web de Amptek, Products for your Imagination. <http://www.amptek.com/xrf/>, (n.d.).
- [81] B. Beckhoff, B. KanngieBer, N. Langhoff, R. Wedel, H. Wolff, Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis, 1st Ed, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2006) pp. 863.
- [82] W.D.W. d W.D. Callister, D.G.D. g Rethwisch, J. Wiley, Materials science and engineering: an introduction, Mater. Sci. Eng. 7 (2007) pp. 266-267.
- [83] Microtrac S3500 SI, Laser Diffractions Particle Size and Image Analyzer, (2000) pp. 1-4.
- [84] ASTM International, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete,

- Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2010) pp. 1-4.
- [85] ASTM International, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield , and Air Content (Gravimetric) of Concrete, Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2009) pp. 1-4.
- [86] ASTM International, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2009) pp. 1-10.
- [87] ASTM International, Standard specification for flow table for Use in tests of hydraulic cement, Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2008) pp. 1-6.
- [88] ASTM International, Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar, Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2008) pp. 1-4.
- [89] ASTM International, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2009) pp. 1-7.
- [90] ASTM International, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2009) pp. 1-6.
- [91] ASTM International, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2008) pp. 1-7.
- [92] ASTM International, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2009) pp. 1-7.
- [93] O. Trocónis, L. Uller, Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico de Corrosion en Estructuras de Concreto Armado, 3a. edición, DURAR y CYTED, (2000) pp. 5-167.
- [94] A.A. Ramezaniapour, Cement Replacement Materials, Springer Geochemistry/Mineralogy, (2014) pp 1-336.
- [95] T. Yang, H. Zhu, Z. Zhang, X. Gao, C. Zhang, Q. Wu, Effect of fly ash microsphere on the rheology and microstructure of alkali-activated fly ash/slag pastes, Cem. Concr. Res. 109 (2018) pp. 198-207.
- [96] D.P. Bentz, K.A. Snyder, M.A. Peltz, K. Obla, H. Kim, Viscosity Modifiers to Enhance Concrete Performance, in: Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), Clim. Chang. 2013 - Phys. Sci. Basis, Cambridge University Press, Cambridge, (2013) pp. 1-30.
- [97] H.A.F. Dehwah, Effect of sulfate concentration and associated cation type on concrete

- deterioration and morphological changes in cement hydrates, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) pp. 29-39.
- [98] D.P. Bentz, S.Z. Jones, M.A. Peltz, P.E. Stutzman, Influence of Internal Curing on Properties and Performance of Cement-Based Repair Materials, (2015) pp. 1-27.
- [99] A. Durán-Herrera, J.M. Mendoza-Rangel, E.U. De-Los-Santos, F. Vázquez, P. Valdez, D.P. Bentz, Accelerated and natural carbonation of concretes with internal curing and shrinkage/viscosity modifiers, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) pp. 1207-1214.
- [100] S.U. Al-Dulaijan, M. Maslehuddin, M.M. Al-Zahrani, A.M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) pp. 429-437.
- [101] W.R. Holden, N.R. Short, C.L. Page, The influence of sulphates and chlorides on concrete durability, Ellis Horwood Publishers, London, (1983) pp. 143-150.
- [102] M. Maes, N. De Belie, Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate, *Cem. Concr. Compos.* 53 (2014) pp. 59-72.
- [103] P. Castro-borges, M. Balancán-zapata, A. Zozaya-ortiz, Electrochemical Meaning of Cumulative Corrosion Rate for Reinforced Concrete in a Tropical Natural Marine Environment, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017 (2017) pp. 8.